проф. К. МЕТЦЛЕР

РАСЧЕТ
УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

ПЕРЕВОД С НЕМЕЦКОГО
ПОД РЕДАКЦИЕЙ ПРОФ. Ю. С. ЧЕЧЕТ



НКТП СССР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА—ЛЕНИНГРАД
1 9 3 2

Замеченные опечатки.

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
6	2 св.	эактивным	реактивным
6	15 „	l_2	I_2
9	5 сн.	e	e_r
10	14 св.	$B_{i\,max}$	$B_{l\,max}$
17	7 „	$\zeta_s = \frac{l_s}{l}$	$\zeta_s \cdot \frac{l_s}{l}$
17	11 „	ζ_s	$\zeta_s \cdot \frac{l_s}{l}$
18	формула (16)	$\frac{E_q + E_{ss}}{E}$	$\frac{E_q + E_{ss}}{E_r}$
21	15 св.	малые	малым
41	17 „	...впадины f_k — через отношение...	...впадины f_k, отношение...
50	формула (46)	$\sqrt{1 + x^2 - x}$	$\sqrt{1 + x^2} - x$
74	6 сн.	$R_{l\,max}$	$B_{l\,max}$
76	4 „	I_{ge}	I_{gl}
95	5 „	E_g	E_q

Метцлер — Расчет универсальных двигателей.

Подготовили к печати:

Редактор А. Д. Смирнов.

Тех. редактор А. Н. Уразова.

сдано в производство 16/II 1932 г.
подписано к печати 7/V 1932 г.

уполномоченный главлита № В-6412
индекс Э.Э.-20-3-3
энергоиздат № 52

бумага 82 × 111/32
в печ. листе 45 360 печ. зн.

---

6 1/4 печ. листов
тираж 10 000

1-я типография Огиза РСФСР „Образцовая“, Москва, Валовая, 28.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Широкое развитие электрификации мелких машин, станков, предметов бытовой нагрузки, наметившееся в последнее время, потребует в ближайшем будущем от нашей промышленности выпуска двигателей малой и очень малой мощности, в особенности так называемых универсальных двигателей коллекторного типа, дающих возможность приключения к сетям как переменного, так и постоянного тока.

Между тем, в советской технической литературе до сего времени не было руководства, рассматривающего методы расчета таких машин. Предлагаемая вниманию читателя небольшая книжка немецкого специалиста в этой области проф. К. Метцлера может, по нашему мнению, восполнить до известной степени этот пробел и послужить пособием как для студентов наших электромашиностроительных втузов, так и для заводских инженеров, занимающихся проектированием и конструированием мелких электродвигателей.

Москва, сентябрь 1931 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Направление вращения двигателя постоянного тока может быть изменено путем перемены направления тока либо в обмотке ротора, либо в обмотке статора. Изменяя направление тока в обеих обмотках одновременно, путем пересоединения подводящих проводников, мы не можем получить изменения направления вращения двигателя. Это свойство двигателя постоянного тока дает возможность при соответствующем устройстве магнитной цепи питать двигатель также и переменным током. Так как при питании переменным током возникает переменный магнитный поток, то весь магнитопровод должен быть собран из возможно тонкого листового железа (как в трансформаторах или нормальных асинхронных двигателях).

Следовательно внешняя конструкция такого двигателя может быть взята такой же, как и у машины постоянного тока, лишь магнитная цепь не должна содержать в себе частей, изготовленных из массивного железа.

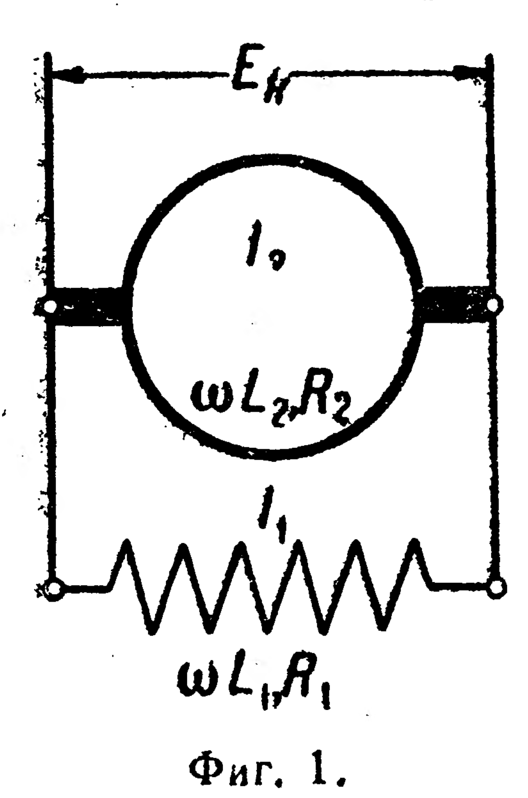
По способу включения статорной и роторной обмоток в машинах постоянного тока различают два основных типа: двигатели с параллельным возбуждением (шунтовые) и двигатели с последовательным возбуждением (сериесные). Установим сперва, обладают ли оба типа такими же хорошими электрическими качествами при питании переменным током, как это имеет место при постоянном токе. Рассмотрим сперва шунтовой двигатель. В этом типе статорная и роторная обмотки присоединяются к питающей сети параллельно, как это показано на фиг. 1. Статорная обмотка имеет омическое сопротивление R_1 ом и индуктивное ωL_1 ом. Роторная обмотка — омическое сопротивление R_2 ом и индуктивное ωL_2 ом.

Так как статорная обмотка состоит из большого числа витков, то ее индуктивное сопротивление ωL_1 во много раз больше, чем ωL_2. Кроме того, R_1 также больше, чем R_2, но отношение $\frac{\omega L_1}{R_1}$ больше, чем $\frac{\omega L_2}{R_2}$.

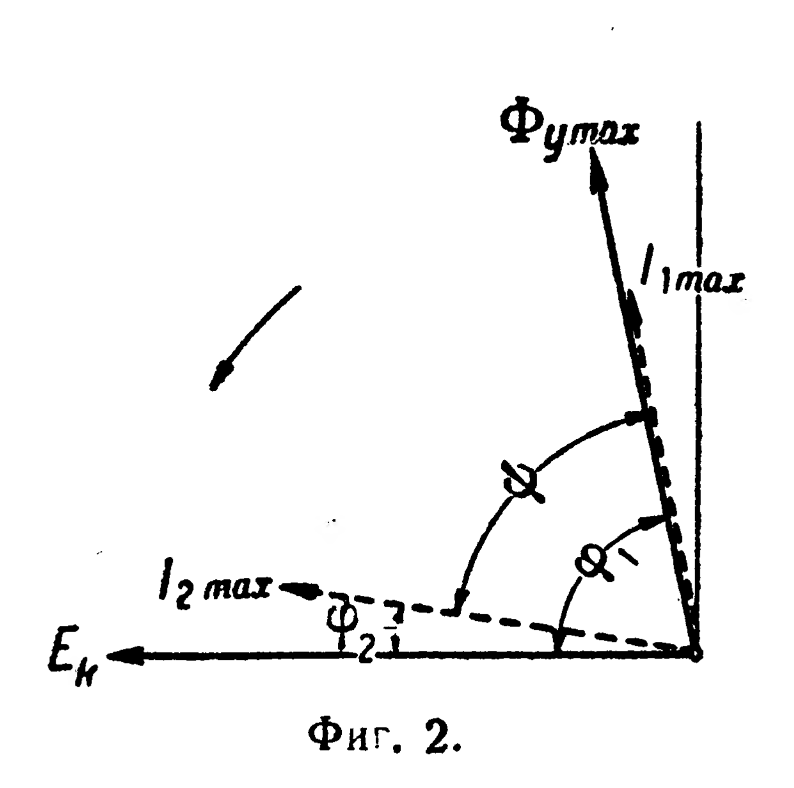
Неподвижная статорная обмотка представляет собой реактивную катушку. Поэтому $\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}$ велик, другими словами, угол φ_1 близок к 90°.

Благодаря этому ток возбуждения I_1 является почти чистым реактивным током и возбуждаемый им магнитный поток почти на 90° отстает от напряжения на зажимах E_k.

Если роторная обмотка также будет потреблять преимущественно реактивную мощность, то естественно, что отдаваемая механическая мощность окажется ничтожной и двигатель будет непригоден для практической работы. Поэтому $\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\omega L_2}{R}$ должен быть небольшим, так чтобы угол φ_2 приближался к нулю. В этом случае роторный ток I_2 будет по преимуществу активным током и будет почти совпадать по фазе с напряжением на зажимах E_k.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Векторная диаграмма для этого случая показана на фиг. 2 [1].

Вращающий момент пропорционален произведению $\Phi_y \cdot I_2$, т. е. может быть выражен уравнением:

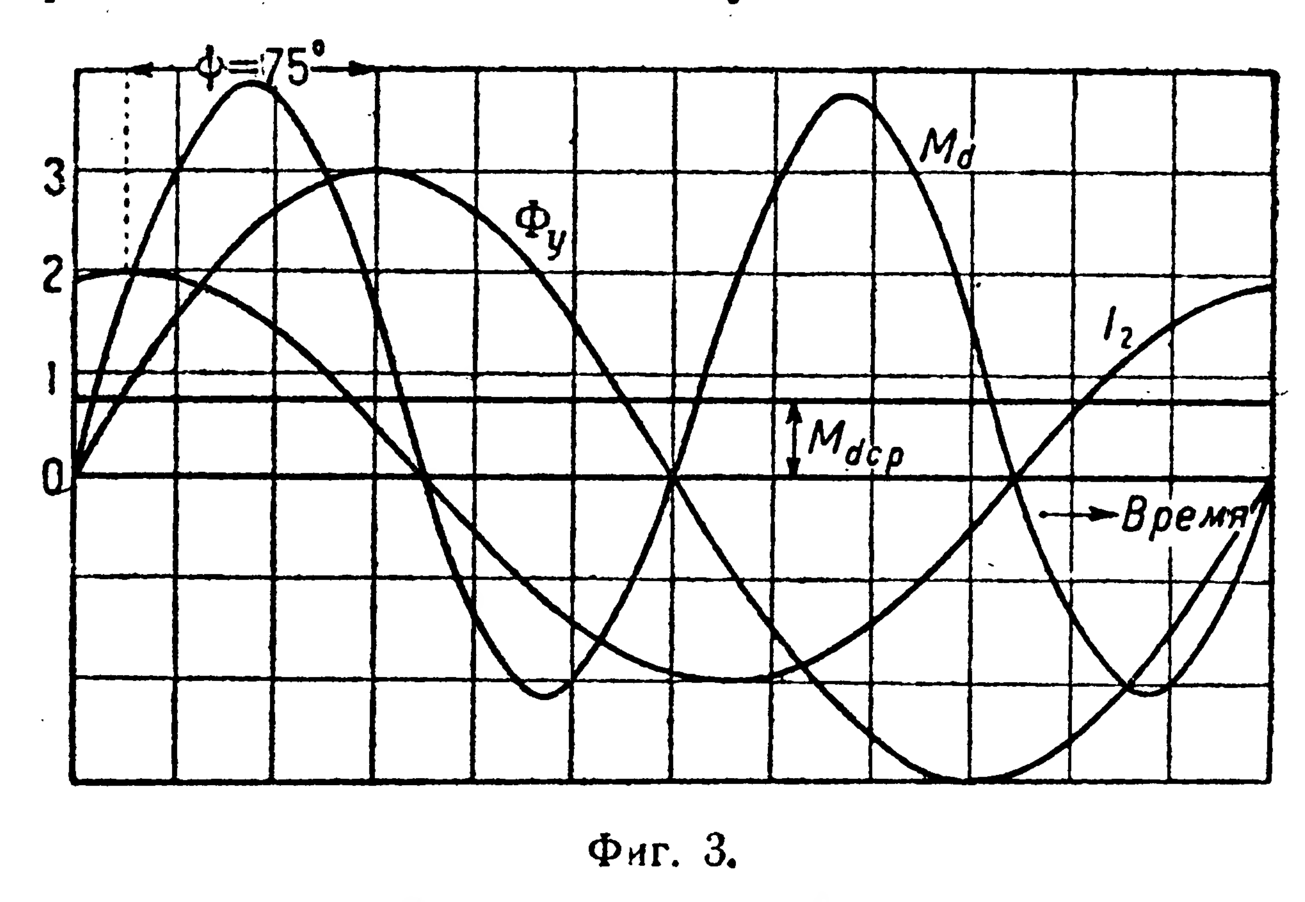
$$M_d = c \cdot \Phi_y \cdot I_2.$$

Φ_y и I_2 образуют между собой угол $\varphi_1 - \varphi_2 = \psi_1$, который в случае шунтового двигателя равен почти 90°. Если бы $\varphi_1 - \varphi_2 = 90°$, то M_d должно было бы равняться нулю. В случае когда $\varphi_1 - \varphi_2$ приближается к 90°, вращающий момент M_d имеет весьма малую величину. Отсюда ясно, что шунтовой двигатель в обычной конструкции не может быть использован для питания переменным током [2].

[1] В этой диаграмме, как и во всех следующих, вращение векторов совершается против часовой стрелки.

[2] В настоящее время существует целый ряд двигателей переменного тока и с шунтовым возбуждением, возможность работы которых с нормальным вращающим моментом обусловлена целым рядом глубоких конструктивных изменений по сравнению с обычными машинами постоянного тока. Так как, однако, в задачу настоящей книги входит рассмотрение лишь универсальных двигателей, работающих одинаково хорошо как от постоянного, так и от переменного тока, то от описания подобных конструкций приходится отказаться. (Прим. ред.)

На фиг. 3 показана линейная диаграмма изменения за один период произведения $\Phi_y \cdot I_2$ для угла $\varphi_1 - \varphi_2 = \psi = 75°$. Среднее значение вращающего момента обозначим через $M_{d\,ср}$. Величина этого среднего значения в данном случае весьма невелика вследствие



Фиг. 3.

большого сдвига фаз ψ между Φ_y и I_2. За половину периода это среднее значение выражается формулой:

$$M_{d\,ср} = \frac{c}{\frac{T}{2}} \int_0^{\frac{T}{2}} \Phi_y \cdot I_2 \cdot dt;$$

$$\Phi_y = \Phi_{y\,max} \cdot \sin \omega t;$$

$$I_2 = I_{2\,max} \cdot \sin (\omega t + \psi);$$

$$M_{d\,ср} = \frac{2 \cdot c}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \Phi_{y\,max} \cdot I_{2\,max} \cdot \sin \omega t \cdot \sin (\omega t + \psi)\, dt;$$

$$M_{d\,ср} = \frac{2 \cdot c}{T} \cdot \Phi_{y\,max} \cdot I_{2\,max} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t \cdot \sin (\omega t + \psi)\, dt.$$

Значение интеграла составляет:

$$\frac{\pi}{2 \cdot \omega} \cos \psi,$$

и так как

$$\omega = 2\pi \cdot f \text{ и } T = \frac{1}{f},$$

где f — число периодов вторичной цепи, то

$$M_{d\,ср} = \frac{2f \cdot \pi \cdot c}{4\pi f} \cdot \Phi_{y\,max} \cdot I_{2\,max} \cdot \cos\psi,$$

$$M_{d\,ср} = c\,\frac{\Phi_{y\,max} \cdot I_{2\,max}}{2} \cos\psi. \qquad (1)$$

На фиг. 3 $c = 1$, $\Phi_{y\,max} = 3$, $I_{2\,max} = 2$, $\psi = 75°$, откуда

$$M_{d\,ср} = \frac{3 \cdot 2}{2} \cos 75° = 3 \cdot 0{,}259 = 0{,}777.$$

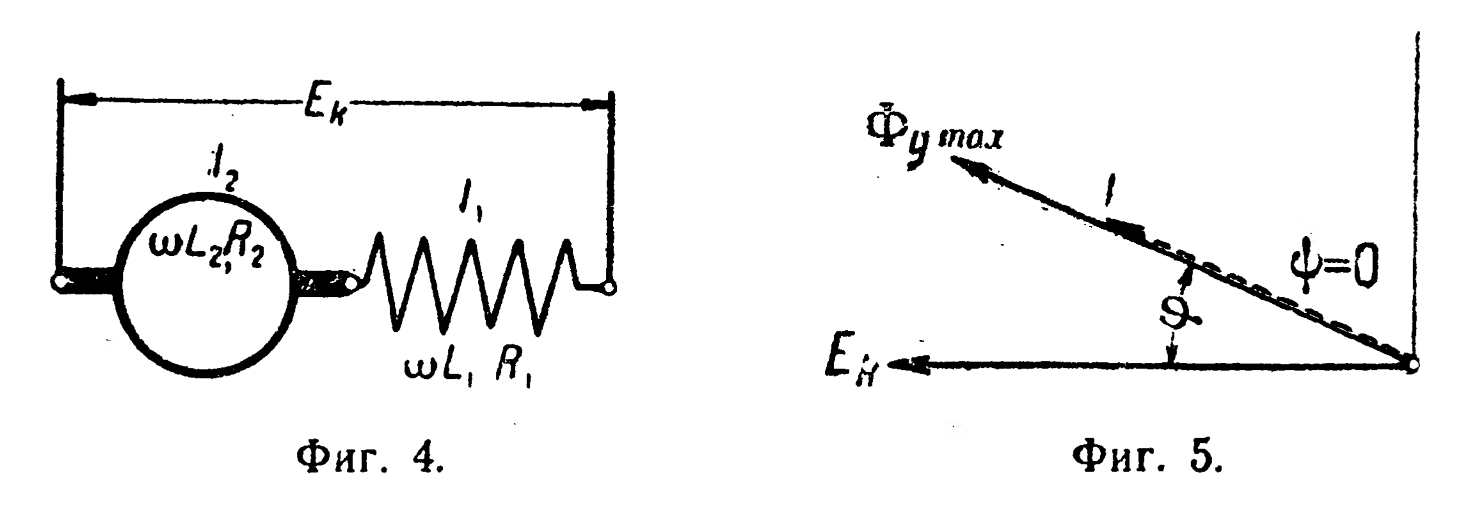
Это же значение может быть найдено и графическим путем.

В случае сериесного включения статорной и роторной обмоток

$$I_1 = I_2,$$

т. е. поток Φ_y и ток I_2 находятся в фазе.

Как видно из фиг. 4, в этом случае нет необходимости ставить индексы при буквах, обозначающих ток, так как во внешней цепи,



Фиг. 4. Фиг. 5.

роторе и в статоре протекает один и тот же ток, т. е. $I_1 = I_2 = I$.

Между E_k и I имеется сдвиг фаз φ, причем:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L_2 + \omega L_1}{R_2 + R_1}.$$

Отсюда получается векторная диаграмма, показанная на фиг. 5. Угол $\psi = 0$, и поэтому $\cos\psi = 1 = \text{maximum}$.

Согласно уравнению (1)

$$M_{d\,ср} = c\,\frac{\Phi_{y\,max} \cdot I_{max}}{2}. \qquad (1a)$$

Таким образом сериесное соединение статорной и роторной обмоток имеет значительные преимущества перед шунтовым.

Если вращающий момент должен быть выражен в килограммометрах, то постоянная c, входящая в уравнение (1a) имеет величину:

$$c = \frac{2 \cdot w_2 \cdot p}{61{,}6 \cdot a} \cdot 10^{-8},$$

где w_2 — полное число витков роторной обмотки,

p — число пар полюсов,

a — число пар параллельных ветвей роторной обмотки.

Если подставить вместо максимального значения тока его эффективное значение, т. е. вместо I_{max} величину $I\sqrt{2}$, то

$$M_{d\,ср} = \frac{w_2\sqrt{2}}{61{,}6} \cdot \frac{p}{a} \cdot \Phi_{y\,max} \cdot I \cdot 10^{-8}\,кгм \qquad (2)$$

Для малых мощностей, рассматриваемых в настоящей книге, удобнее выражать вращающий момент в килограммосантиметрах. Тогда

$$M_{d\,ср} = \frac{w_2 \cdot \sqrt{2}}{61{,}6} \cdot \frac{p}{a} \cdot \Phi_{y\,max} \cdot I \cdot 10^{-6}\,кгсм. \qquad (2a)$$

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ, НАВОДИМЫЕ В РОТОРНОЙ ОБМОТКЕ

Э. д. с. вращения, вызываемая пересечением проводников ротора силовыми линиями магнитного потока $\Phi_{y\,max}$, для двигателя постоянного тока выражается формулой:

$$E_r = z_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot 10^{-8} \text{ вольт},$$

где $z_2 = 2w_2$ — число проводников ротора,

n — число оборотов в минуту.

При питании переменным током мгновенное значение э. д. с. вращения будет выражаться точно такой же формулой, но в нее должно быть подставлено мгновенное значение магнитного потока; поэтому

$$\Phi_y = \Phi_{y\,max} \cdot \sin \omega t,$$

$$e_r = 2w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot 10^{-8} \sin \omega t,$$

$$e_{r\,max} = 2 \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot 10^{-8}.$$

Так как отношение эффективного значения к максимальному равно $\frac{1}{\sqrt{2}}$, то эффективное значение э. д. с. вращения:

$$E_r = \sqrt{2} \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot 10^{-8}.$$

Частота перемагничивания роторного железа:

$$f_2 = \frac{pn}{60}.$$

Вводя это значение в формулу э. д. с. вращения, получим:

$$E_r = \frac{\sqrt{2}}{a} \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}. \qquad (3)$$

В частном случае двухполюсной машины $a = 1$, и поэтому [1]:

$$E_{r\,(2p=2)} = \sqrt{2} \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}. \qquad (3а)$$

Если l — осевая длина ротора и статора,

b_p — длина полюсной дуги,

$\tau_p = \frac{D\pi}{2p}$ — полюсное деление,

$a_l = \frac{b_p}{\tau_p}$,

$B_{l\,max}$ — магнитная индукция в воздушном промежутке, то сечение воздушного промежутка под одним полюсом

$$Q_l = b_p \cdot l = a_l \cdot \tau_p \cdot l,$$

$$\Phi_{y\,max} = Q_l\ B_{l\,max} = a_l \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{l\,max}.$$

Число витков статора, приходящееся на один полюс, обозначим через w_1; тогда полное число витков статора будет составлять $2p \cdot w_1$.

Воздушный промежуток пусть составляет δ *см*, а с учетом влияния впадин ротора — δ' *см*; чтобы учесть магнитное сопротивление железа, расчетный воздушный промежуток придется несколько увеличить по сравнению с действительным. Эту величину мы будем обозначать через δ'' *см*.

Как известно,

$$B_{l\,max} = \frac{4\pi}{10} \cdot w_1 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\delta''},$$

$$\Phi_{y\,max} = a_l \cdot \tau_p \cdot l \cdot \frac{4\pi}{10} \cdot w_1 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\delta''}. \qquad (4)$$

---

[1] Строго говоря, a может быть равным 1 не только для двухполюсной машины, а и при любом числе полюсов, если обмотка ротора выполнена как простая последовательная. Поэтому формула (3а) должна применяться не по признаку числа полюсов, а в случае простой последовательной обмотки. (Прим. ред.)

Подставляя уравнение (4) в (3), получим:

$$E_r = \frac{\sqrt{2}}{a} \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot a_l \cdot \tau_p \cdot l \frac{4\pi}{10} \cdot w_1 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\delta''} 10^{-8},$$

$$E_r = \left(\frac{8\pi a_l}{10\delta''}\right) \cdot f_2 \cdot \tau_p \cdot l \cdot \frac{w_2}{a} \cdot w_1 \cdot I \cdot 10^{-8}.$$

Полагая для сокращения

$$\frac{8\pi a_l}{10\delta''} = k_1 \tag{5}$$

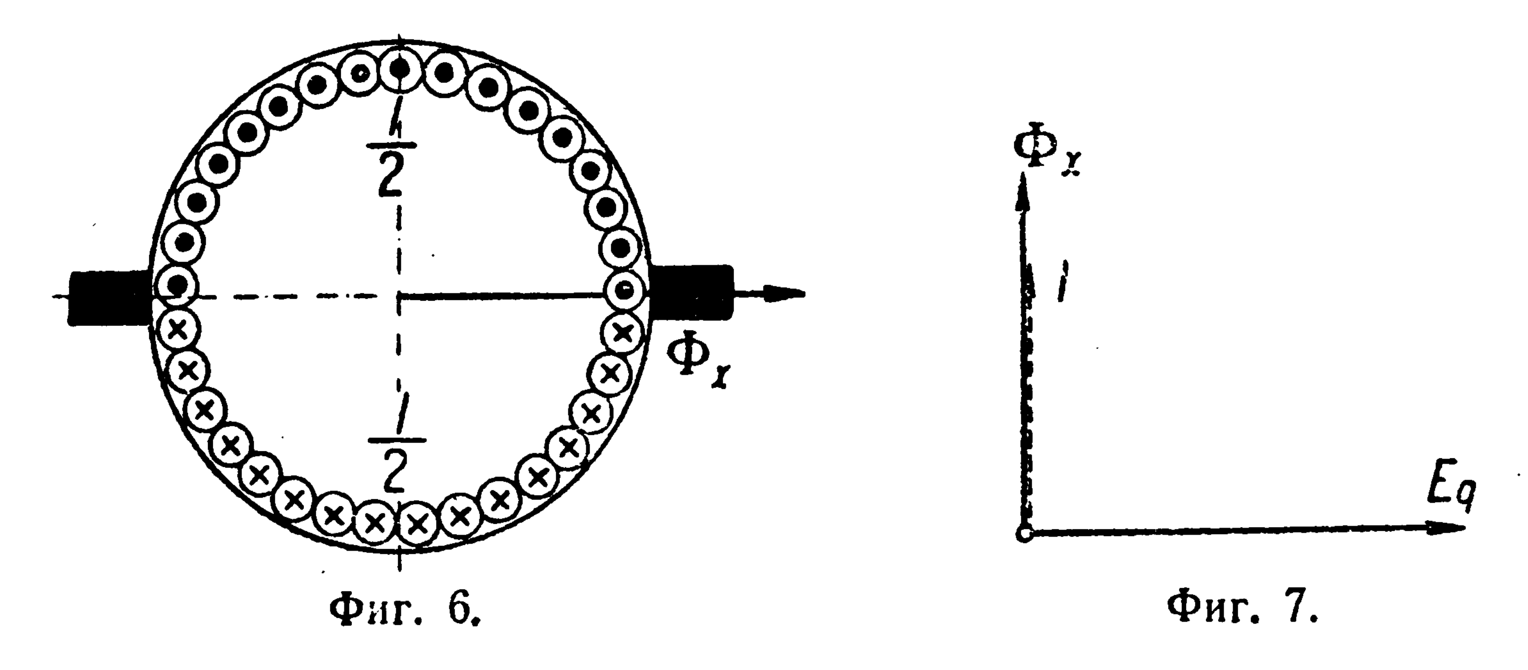
и принимая во внимание, что передаточное число

$$\frac{w_1}{\left(\frac{w_2}{a}\right)} = u, \tag{6}$$

получим:

$$E_r = k_1 \cdot u \cdot f_2 \cdot \tau_p \cdot l \left(\frac{w_2}{a}\right)^2 \cdot I \cdot 10^{-8} \text{ вольт.} \tag{7}$$

Как показано на фиг. 6, обмотка ротора обтекается переменным током I. Ампервитки ротора возбуждают при этом поперечный



Фиг. 6. Фиг. 7.

магнитный поток Φ_x, находящийся в фазе с током I. Этот поток расположен в пространстве неподвижно и колеблется (на фиг. 6 по горизонтали) с числом циклов f_1 тока I.

При этом в обмотке ротора совершенно так же, как в обмотке трансформатора, возникает э. д. с. Эта э. д. с. отстает от вызывающего ее потока Φ_x на 90°, как показано на фиг. 7. Величина этой поперечной э. д. с:

$$E_q = 2k \cdot f_1 \cdot w_q \cdot \Phi_{x\,max} \cdot 10^{-8} \text{ вольт,}$$

где k — коэфициент Каппа,

w_q — число витков ротора, обусловливающее создание э. д. с. E_q.

Так как на диаграмме E_q расположена перпендикулярно к току, то она является реактивной э. д. с

При определении E_q мы для упрощения сделаем следующие допущения:

1. В качестве намагничивающих ампервитков мы рассмотрим лишь те, которые расположены под полюсной дугой b_p:

$$Aw_{q\text{ на полюс}} = \sqrt{2}\frac{I}{2a}\cdot\frac{a_i\cdot w_2}{2p},$$

$$w_{q\text{ на полюс}} = \frac{w_2}{2p}.$$

При таком допущении магнитный поток Φ_x получится несколько меньше, так как часть намагничивающих ампервитков остается не учтенной; однако возникающая при этом ошибка незначительна, так как силовые линии в пространстве между полюсами должны преодолеть большой путь в воздухе, т. е. большое магнитное сопротивление.

2. Магнитным сопротивлением в железе ротора и статора мы будем пренебрегать. При этом число силовых линий получится несколько больше, чем отчасти компенсируется ошибка, сделанная при первом допущении. Магнитное сопротивление зубцового слоя ротора мы предусмотрим тем, что воздушный промежуток увеличим на 10%. Таким образом длина пути силовых линий будет нами принята равной $1{,}1\cdot 2\delta$ *см*, так как воздушный промежуток пронизывается магнитным потоком дважды.

Тогда:

$$\frac{\Phi_{x\max}}{2} = \frac{4\pi}{10}\cdot\frac{Aw_{q\text{ на полюс}}}{R},$$

$$R = \frac{2{,}2\,\delta'}{\frac{Q_l}{2}} = \frac{4{,}4\,\delta'}{Q_l} = \frac{4{,}4\,\delta'}{a_i\cdot\tau_p\cdot l},$$

$$\frac{\Phi_{x\max}}{2} = \frac{4\pi}{10}\cdot\frac{\sqrt{2}\cdot I\cdot a_i^2\cdot w_2\cdot\tau_p\cdot l}{2a\cdot 2p\cdot 4{,}4\,\delta'}.$$

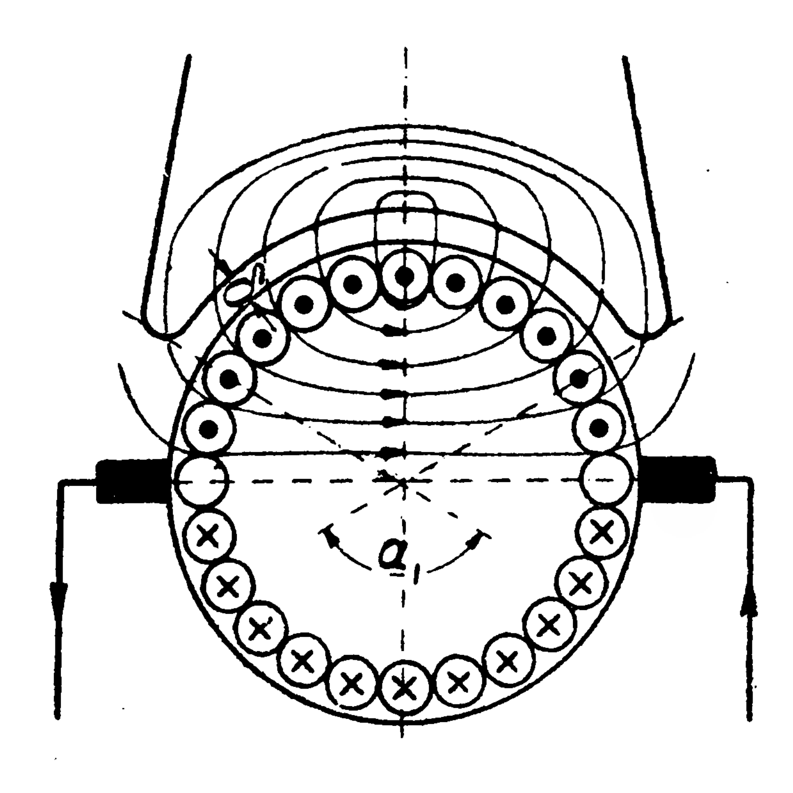
Тогда на пару полюсов:

$$E_{q1} = 2k\cdot f_1\cdot\frac{a_i^2\cdot w_2^2}{2p}\cdot\frac{8\pi}{10}\cdot\frac{\sqrt{2}\cdot I\cdot\tau_p\cdot l}{2a\cdot 2p\cdot 4{,}4\,\delta'}\cdot 10^{-8}.$$

Для p пар полюсов:

$$E_q = k\cdot f_1\cdot\frac{a_i^2 w_2^2\cdot 2\pi\sqrt{2}\cdot I\cdot\tau_p\cdot l}{11\delta\cdot 2a\cdot 2p}\cdot 10^{-8}\text{ вольт}.$$

Коэфициент Каппа определяется по известным методам. На фиг. 9 показана э. д. с., возникающая при пересечении проводников ротора силовыми линиями поперечного магнитного потока Φ_x. Как видно из фиг. 8, северный и южный полюса потока Φ_x лежат непосредственно друг возле друга.



Фиг. 8.

Каждый полюс машины в средней трети свободен от силовых линий, так как по нашему предположению в пространстве между полюсами нет силовых линий. Если принять $a_l = \frac{2}{3}$, то расстояние между полюсами составляет $\frac{1}{3}$ окружности. Коэфициент Каппа определяется по формуле:

$$k = \frac{2\sigma}{a_l} k_s,$$

Фиг. 9.

где $\sigma = \frac{E_{eff}}{E_{max}}$ — коэфициент амплитуды,

$$k_s = \frac{\text{число проводников под полюсной дугой}}{\text{полное число проводников одной секционной стороны}},$$

$$a_l = \frac{b_p}{\tau_p} = \frac{2}{3}.$$

На фиг. 9:

$$k_s=\frac{2}{3},$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{2\cdot\frac{3}{3}}{9}}=\frac{\sqrt{2}}{3}=0,472,$$

$$k=\frac{2\cdot 0,472}{\frac{2}{3}}\cdot\frac{2}{3}=0,944.$$

Подставляя это значение и $a_l=\frac{2}{3}$ в уравнение для E_q, получим после сокращения:

$$E_q=0,34\cdot\frac{f_1}{2a\cdot 2p}\cdot\frac{\tau_p\cdot l}{\delta'}\cdot I\cdot w_2^2\cdot 10^{-8}\text{ вольт.} \tag{8}$$

Для двухполюсной конструкции при $2p=2a=2$:

$$E_{q(2p=2)}=0,085\cdot f_1\cdot\frac{\tau_p\cdot l}{\delta'}\cdot I\cdot w_2^2\cdot 10^{-8}\text{ вольт.} \tag{8a}$$

Поперечная э. д. с. E_q может достигать весьма заметной величины. Она оказывает большое влияние на коэфициент мощности двигателя переменного тока и поэтому нужно стремиться к ее возможному уменьшению.

Для одного двухполюсного двигателя, работающего при напряжении на зажимах $E_k=220$ V, при $f_1=50$ циклов получаются следующие значения:

$$\frac{\tau_p\cdot l}{\delta'}=\frac{10,2\cdot 5,3}{0,08}=677,$$

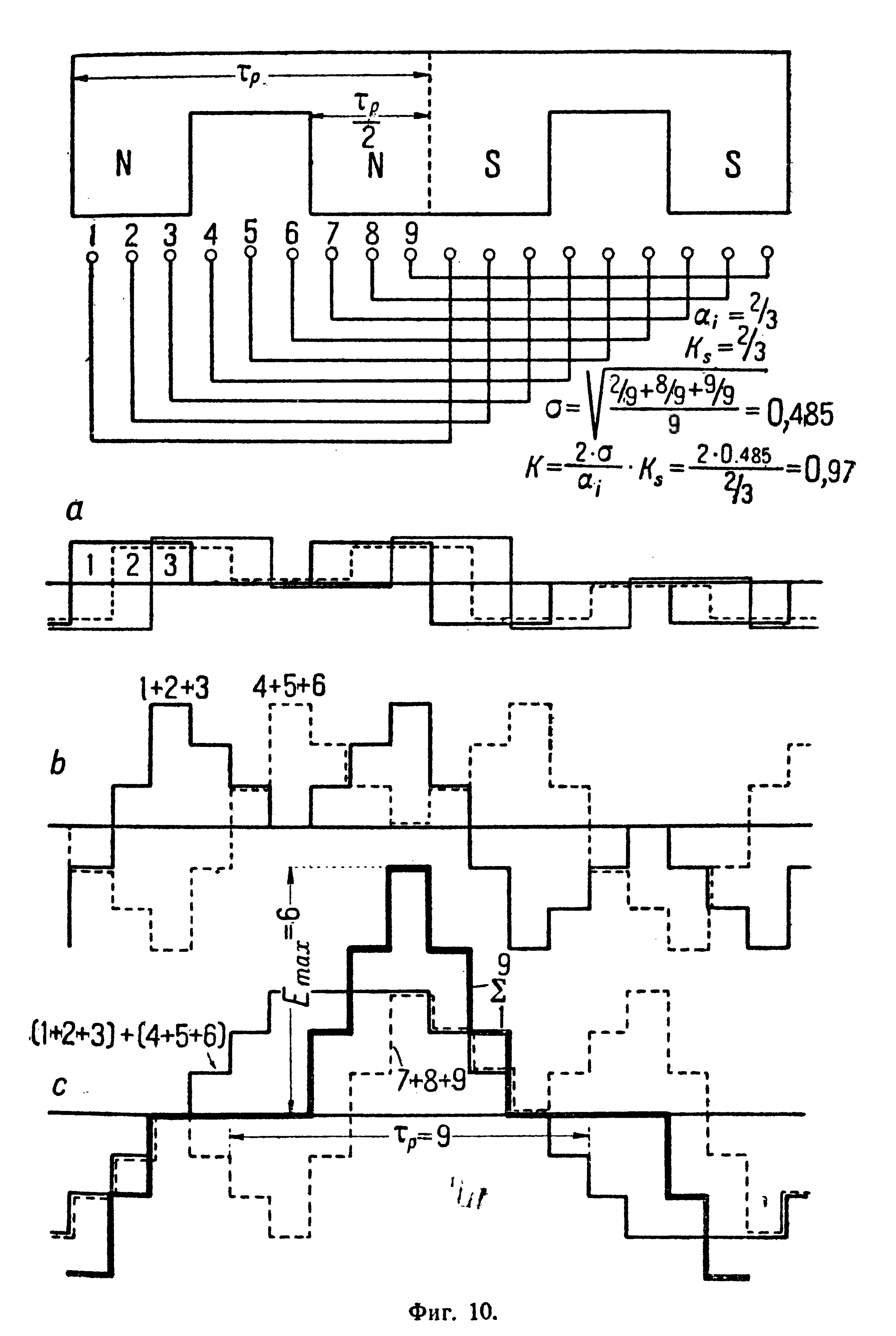
$$I=1,3\text{ A},$$

$$w_2=1\,120\text{ витков.}$$

Так как $a_l=\frac{2}{3}$, то

$$E_q=0,085\cdot 50\cdot 677\cdot 1,3\cdot 1\,120^2\cdot 10^{-8}=47\text{ вольт.}$$

Мы видим, что поперечная э. д. с. достигает здесь $21,4\%$ от напряжения на зажимах. При этом, конечно, нельзя ожидать большого коэфициента мощности. На фиг. 10 показана роторная обмотка с девятью впадинами на полюсное деление, проводники которой пересекаются силовыми линиями поперечного магнитного потока Φ_x. Кривая электродвижущей силы для проводников одной впадины имеет такую же форму, как и кривая магнитного потока. На фиг. 10,*a*



τ_p
$\frac{\tau_p}{2}$
N
N
S
S
1 2 3 4 5 6 7 8 9
$\alpha_i = 2/3$
$K_s = 2/3$
$\sigma = \sqrt{\frac{2/9 + 8/9 + 9/9}{9}} = 0,485$
$K = \frac{2 \cdot \sigma}{\alpha_i} \cdot K_s = \frac{2 \cdot 0.485}{2/3} = 0,97$
a
1 2 3
1+2+3
4+5+6
b
$E_{max} = 6$
$\Sigma 9$
(1+2+3) + (4+5+6)
7+8+9
c
$\tau_p = 9$

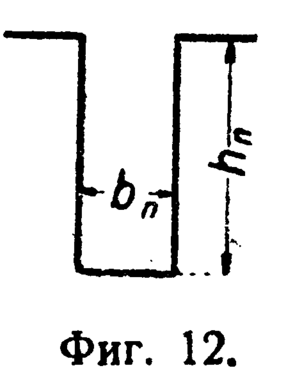
Фиг. 10.

начерчены э. д. с. первых трех впадин и их результирующая. На фиг. 10,*b* две таких результирующих сложены вместе и на фиг. 10,*c* к ним прибавлена еще результирующая последних трех впадин. Таким образом на фиг 10,*c* найдена результирующая э. д. с. всех девяти впадин, представляющая собой ступенчатую линию, имеющую коэфициент Каппа $k=0{,}97$. Эта величина на 2,5% больше, чем найденная ранее для вполне распределенной обмотки. Однако острые углы в фиг. 10 практически всегда сглаживаются, так что k получает значение 0,94÷0,95. Совершенно отчетливо видно из диаграммы фиг. 10, что $k_s=\frac{2}{3}$, так как, несмотря на то, что складываются э д. с. девяти впадин, максимальное значение результирующей имеет высоту лишь 6 единиц, а не 9, и

$$k_s=\frac{6}{9}=\frac{2}{3}.$$

Фиг. 11.

Через впадины ротора и вокруг лобовых соединений обмотки проходит поток рассеяния Φ_{s_2} (фиг. 11), который находится в фазе с током I. Этот поток возбуждает реактивное напряжение, величина которого может определяться по формуле:



Фиг. 12.

$$E_{ss}=4{,}44\cdot f_1\cdot\frac{w_2^2}{2p}\cdot\frac{I}{2a}\cdot\sqrt{2}\cdot\zeta\cdot l\cdot 10^{-8}\ \text{вольт},$$

$$\zeta=\zeta_n+\zeta_s\frac{l_s}{l},$$

где ζ_n — проводимость впадины,
ζ_s — проводимость лобовых соединений,
l_s — длина одного лобового соединения.

Если z_n — число впадин, то для открытых впадин (фиг. 12)

$$\zeta_n=0{,}83\,\frac{h_n}{b_n}\cdot\frac{2p}{z_n},$$

для полузакрытых впадин величина ζ_n в два раза больше. Для ζ_s можно принять значение, ра ное единице.

Число впадин на полюс $\left(\frac{z_n}{2p}\right)$ для рассматриваемых в этой книге небольших машин лежит примерно в пределах между 5 и 10. Отношение $h_n:b_n$ лежит в пределах между 2 и 4.

Для двухполюсных машин $\frac{l_s}{l} \cong 1,4 \frac{D}{l}$;

для четырехполюсных машин $\frac{l_s}{l} \cong 1,4 \frac{\tau_p}{l}$.

Для предварительных расчетов можно пользоваться следующими средними значениями.

Двухполюсные машины.

Полузакрытые впадины: $\zeta_n = 2 \cdot 0,83 \cdot 3 \frac{1}{10} = 0,50$,

$$\zeta_s = \frac{l_s}{l} = 1 \cdot 1,4 \cdot 1,2 \cong 1,7$$

$$\zeta = 2,2.$$

Четырехполюсные машины.

Открытые впадины: $\zeta_n = 0,83 \cdot 3 \frac{1}{5} = 0,5$,

$$\zeta_s = 1 \cdot 1,4 \cdot 1,2 = 1,7$$

$$\zeta = 2,2.$$

Принимая во внимание все найденные численные величины, получим для двухполюсных машин:

$$E_{ss\,(2p=2)} = 3,5 \cdot f_1 \cdot l \cdot I \cdot w_2^2 \cdot 10^{-8} \text{ вольт}; \tag{9}$$

для многополюсных машин:

$$E_{ss} = \frac{14}{2p \cdot 2a} \cdot f_1 \cdot l \cdot I \cdot w_2^2 \cdot 10^{-8} \text{ вольт}. \tag{9a}$$

Наконец, в общем виде:

$$E_{ss} = \left(\frac{2\pi\zeta}{2a \cdot 2p}\right) \cdot f_1 \cdot l \cdot I \cdot w_2^2 \cdot 10^{-8} \text{ вольт}. \tag{9b}$$

Для возможного упрощения конструкций небольших двигателей последовательного возбуждения приходится отказываться от устройства компенсационной обмотки, уничтожающей поперечный магнитный поток Φ_x. Поэтому в роторе будут иметь место две активных составляющих, а именно: E_r и омическое падение напряжения ε и две реактивных составляющих E_q и E_{ss}.

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ, НАВОДИМЫЕ В СТАТОРНОЙ ОБМОТКЕ

Колебания потока Φ_y (фиг. 11) наводят в обмотке статора реактивную э. д. с. E_{s_1}, которая при синусоидальном изменении потока имеет величину:

$$E_{s_1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot 2p \cdot w_1 \cdot \sigma \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}, \tag{10}$$

где σ — коэфициент рассеяния,

w_1 — число витков, приходящееся на один полюс.

Коэфициент рассеяния σ, вследствие небольшой величины числа ампервитков статорной обмотки, меньше, чем в машинах постоянного тока. В среднем можно полагать $\sigma = 1{,}05$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

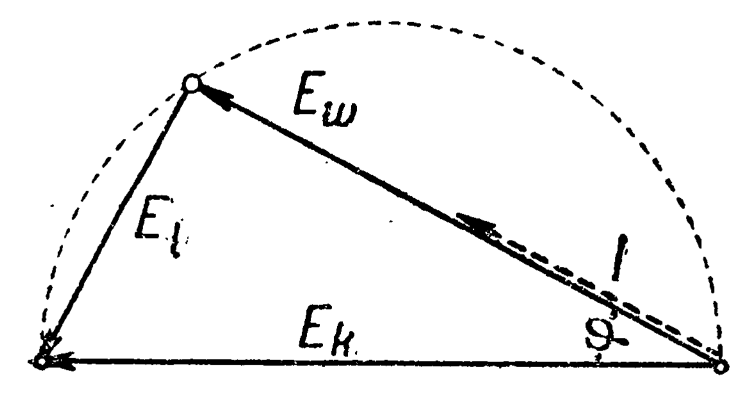
Подводимое к двигателю напряжение уравновешивается в нем двумя составляющими — активной и реактивной. Активная составляющая

$$E_w = E_k \cdot \cos\varphi = E_r + \varepsilon, \tag{11}$$

где ε представляет собой полное омическое падение напряжения в двигателе. Реактивная составляющая имеет величину:

$$E_{bl} = E_k \cdot \sin\varphi = E_{s1} + E_q + E_{ss}. \tag{12}$$

Омическое падение напряжения составляет ε_p % от E_r, т. е.



Фиг. 13.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_p E_r}{100}. \tag{13}$$

Тогда

$$E_w = E_r\left(1 + \frac{E_p}{100}\right). \tag{14}$$

Согласно фиг. 13

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{E_{bl}}{E_w} = \frac{E_{bl}}{E_r\left(1 + \frac{E_p}{100}\right)}. \tag{15}$$

Пользуясь уравнением 12, получим:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_p}{100}}\left(\frac{E_{s1}}{E_r} + \frac{E_q + E_{ss}}{E_r}\right). \tag{16}$$

Разделив уравнение 10 на уравнение 3, найдем:

$$\frac{E_{s_1}}{E_r} = \frac{4{,}44 \cdot f_1 \cdot 2p \cdot \sigma \cdot w_1 \cdot \Phi_{y\,\max} \cdot 10^{-8}}{\frac{\sqrt{2}}{a} \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,\max} \cdot 10^{-8}} = \pi \cdot 2p \cdot \sigma \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right) \cdot u.$$

Разделив сумму уравнений 8 и 9 на уравнение 7, получим:

$$\frac{E_q + E_{ss}}{E_r} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right) \cdot \frac{1}{u} \cdot \left[\frac{0{,}85}{8\pi \cdot a_i} \cdot \frac{2a}{2p} \cdot \left(\frac{\delta''}{\delta'} + 18{,}5\,\zeta\,\frac{\delta''}{\tau_p}\right)\right].$$

Для упрощения обозначим выражение, стоящее в прямоуго льных скобках, через k_2, т. е.:

$$k_2 = \frac{0{,}85}{8\pi \cdot \alpha_i} \cdot \frac{2a}{2p} \cdot \left(\frac{\delta''}{\delta'} + 18{,}5\,\zeta\,\frac{\delta''}{\tau_p}\right). \qquad (17)$$

Тогда

$$\frac{E_q + E_{ss}}{E} = k_2 \cdot \frac{f_1}{f_2} \cdot \frac{1}{u},$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_p}{100}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right)\left[2p \cdot \pi \cdot \sigma \cdot u + \frac{k_2}{a}\right]. \qquad (18)$$

Из уравнения 18 следует, что $\operatorname{tg}\varphi$ будет тем меньше, чем меньше отношение $\frac{f_1}{f_2}$. Для этого частота тока сети должна быть небольшой по сравнению с частотой вращения ротора. Небольшие двигатели, рассматриваемые в настоящей книге, нормально работают от осветительных сетей с частотой $f_1 = 50$ циклов. Для того чтобы достигнуть при этом хорошего коэфициента мощности, скорость вращения (число оборотов в минуту) машины должна быть большой. Для числа оборотов ниже синхронного такие двигатели непригодны.

При синхронизме: для $2p = 2$ $n = 3\,000$,

$2p = 4$ $n = 1\,500$ об/мин.

Однако эти двигатели работают значительно лучше при сверхсинхронной скорости. Для $\frac{f_2}{f_1} = 2$ при двухполюсной машине число оборотов должно быть 6 000 в мин. При этом достигается относительно больший коэфициент мощности. Для четырехполюсной машины при тех же условиях n должно быть равно 3 000 об/мин. Для заданного отношения $\frac{f_1}{f_2}$, согласно уравнению 18, максимум или минимум $\operatorname{tg}\varphi$ получается при определенном значении u. В этом случае выражение

$$y = 2p \cdot \pi \cdot \sigma \cdot u + \frac{k_2}{u}$$

должно иметь минимум.

При

$$\frac{dy}{du} = 2p \cdot \pi \cdot \sigma \cdot - \frac{k_2}{u^2} = 0$$

$$u = \sqrt{\frac{k_2}{2p \cdot \pi \cdot \sigma}}. \qquad (19)$$

Так как $\frac{d^2y}{du^2}$ положительно, то минимум получается при

$$u=\sqrt{\frac{k_2}{2p\cdot\pi\cdot\sigma}}.$$

Для двухполюсных машин $\frac{2a}{2p}=1$. Насыщение в железе этих машин выбирается небольшим, так что отношение $\frac{\delta''}{\delta'}$ едва ли будет превосходить 1,2. Выбирая, кроме того, $\zeta=2{,}2$, $\frac{\delta''}{\tau_p}=0{,}012$, получим:

$$k_2=\frac{0{,}85\cdot 3}{8\cdot\pi\cdot 2}(1{,}2+18{,}5\cdot 2{,}2\cdot 0{,}012)=0{,}086,$$

$$u=\sqrt{\frac{0{,}086}{2\cdot\pi\cdot 1{,}05}}=0{,}114.$$

При синхронном числе оборотов и $\varepsilon_p=25\%$

$$(\operatorname{tg}\varphi)_{\min}=\frac{1}{1{,}25}\cdot 2\cdot\sqrt{2p\cdot\pi\cdot\sigma\cdot k_2}=\frac{2}{1{,}25}\sqrt{2\pi\cdot 1{,}05\cdot 0{,}086}=1{,}2,$$

$$(\cos\varphi)_{\max}=0{,}64.$$

Подставляя уравнение 19 в 18, получим:

$$(\operatorname{tg}\varphi)_{\min}=\frac{2}{1+\frac{\varepsilon_p}{100}}\cdot\left(\frac{f_1}{f_2}\right)\sqrt{2p\cdot\pi\cdot\sigma\cdot k_2}. \qquad (20)$$

Наш численный пример показывает, что при выбранных соотношениях, мы можем получить самое большее

$$\cos\varphi=0{,}64.$$

Для четырехполюсной машины с последовательной обмоткой и открытыми впадинами отношение $\frac{2a}{2p}=0{,}5$.

Тогда $k_2=\frac{0{,}85\cdot 0{,}5\cdot 3}{8\cdot\pi\cdot 2}(1{,}2+18{,}5\cdot 2{,}2\cdot 0{,}02)=0{,}05.$

Отношение $\frac{\delta''}{\tau_p}$ для четырехполюсных машин больше, чем для

двухполюсных, так как τ_p меньше. Поэтому следует принять $\frac{\delta''}{\tau_p} = 0,02$,

$$u = \sqrt{\frac{0,05}{4\pi \cdot 1,05}} = 0,0615,$$

$$(\text{tg}\,\varphi)_{\min} = \frac{2}{1,25}\sqrt{4 \cdot \pi \cdot 1,05 \cdot 0,05} = 1,3,$$

$$\cos\varphi = 0,61.$$

Таким образом четырехполюсная конструкция в отношении коэфициента мощности менее выгодна, чем двухполюсная.

Для конструктора особенно важной является зависимость коэфициента мощности от передаточного числа u. Однако нужно выяснить, будет ли экономически выполнимым и соответствующий $\cos\varphi_{\max}$.

В предыдущих примерах в среднем $u = 0,1$, т е. число витков ротора было в 10 раз больше числа витков статора. Поэтому необходимо установить зависимость $\cos\varphi = f(u)$ от отношения $\frac{f_1}{f_2}$. Малые значения u, т. е. как раз те, которым соответствует $\cos\varphi_{\max}$, практически непригодны, и уже $u = 0,1$ является слишком малые значением. Чем быстроходнее машина, тем меньше процентное омическое падение напряжения. Для ε_p должны поэтому при различных отношениях $\frac{f_1}{f_2}$ быть приняты различные значения. В среднем для

$f_1 : f_2 =$	0,333	0,5	0,667	1	1,5
$\varepsilon_p =$	8	12,5	17,5	25	35%

В следующих таблицах I и II подсчитаны выражения, заключенные в формуле 18 в прямоугольные скобки, для различных значений.

Таблица I (двухполюсные машины).

$u =$	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	1
$2p \cdot \pi \cdot \sigma \cdot u =$	0,33	0,495	0,66	0,99	1,32	1,98	2,64	3,3	6,6
$k_2 : u =$	1,72	1,145	0,86	0,573	0,43	0,29	0,215	0,17	0,086
$\left[2p \cdot \pi \cdot \sigma \cdot u + \frac{k_2}{u}\right] \cdot \pi =$	2,05	1,64	1,52	1,563	1,75	2,27	2,855	3,47	6,685

Таблица II (четырехполюсные машины с последовательной обмоткой).

$u =$	0,05	0,0615	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3
$2p \cdot \pi \cdot \sigma \cdot u =$	0,66	0,816	0,99	1,32	1,98	2,64	3,96
$k_2 : u =$	1,00	0,814	0,67	0,50	0,33	0,25	0,17
$\left[2p \cdot \pi \cdot \sigma \cdot u + \frac{k_2}{u}\right] =$	1,66	1,63	1,66	1,82	2,31	2,89	4,13

Таблица III (двухполюсные машины).

1. $\frac{f_1}{f_2}=0{,}333,\quad \varepsilon_p=8\%$ дает $\frac{\frac{f_1}{f_2}}{1+\frac{\varepsilon_p}{100}}=\frac{0{,}333}{1{,}08}=0{,}318.$

$u=$	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	1
$\operatorname{tg}\varphi=$	0,65	0,52	0,483	0,497	0,556	0,72	0,906	1,1	2,12
$\cos\varphi=$	0,838	0,887	0,90	0,895	0,874	0,811	0,74	0,673	0,425

2. $\frac{f_1}{f_2}=0{,}5,\quad \varepsilon_p=12{,}5\%,\quad \frac{\frac{f_1}{f_2}}{1+\frac{\varepsilon_p}{100}}=\frac{0{,}5}{0{,}125}=0{,}444.$

$u=$	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	1
$\operatorname{tg}\varphi=$	0,91	0,73	0,675	0,695	0,777	1,01	1,27	1,54	2,97
$\cos\varphi=$	0,74	0,807	0,829	0,82	0,789	0,703	0,618	0,514	0,32

3. $\frac{f_1}{f_2}=0{,}667,\quad \varepsilon_p=17{,}5\%,\quad \frac{\frac{f_1}{f_2}}{1+\frac{\varepsilon_p}{100}}=\frac{0{,}667}{1{,}175}=0{,}567.$

$u=$	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	1
$\operatorname{tg}\varphi=$	1,165	0,93	0,86	0,885	0,992	1,29	1,62	1,97	3,8
$\cos\varphi=$	0,651	0,732	0,758	0,75	0,71	0,61	0,525	0,452	0,255

4. $\frac{f_1}{f_2}=1,\quad \varepsilon_p=25\%,\quad \frac{\frac{f_1}{f_2}}{1+\frac{\varepsilon_p}{100}}=\frac{1}{1{,}25}=0{,}8.$

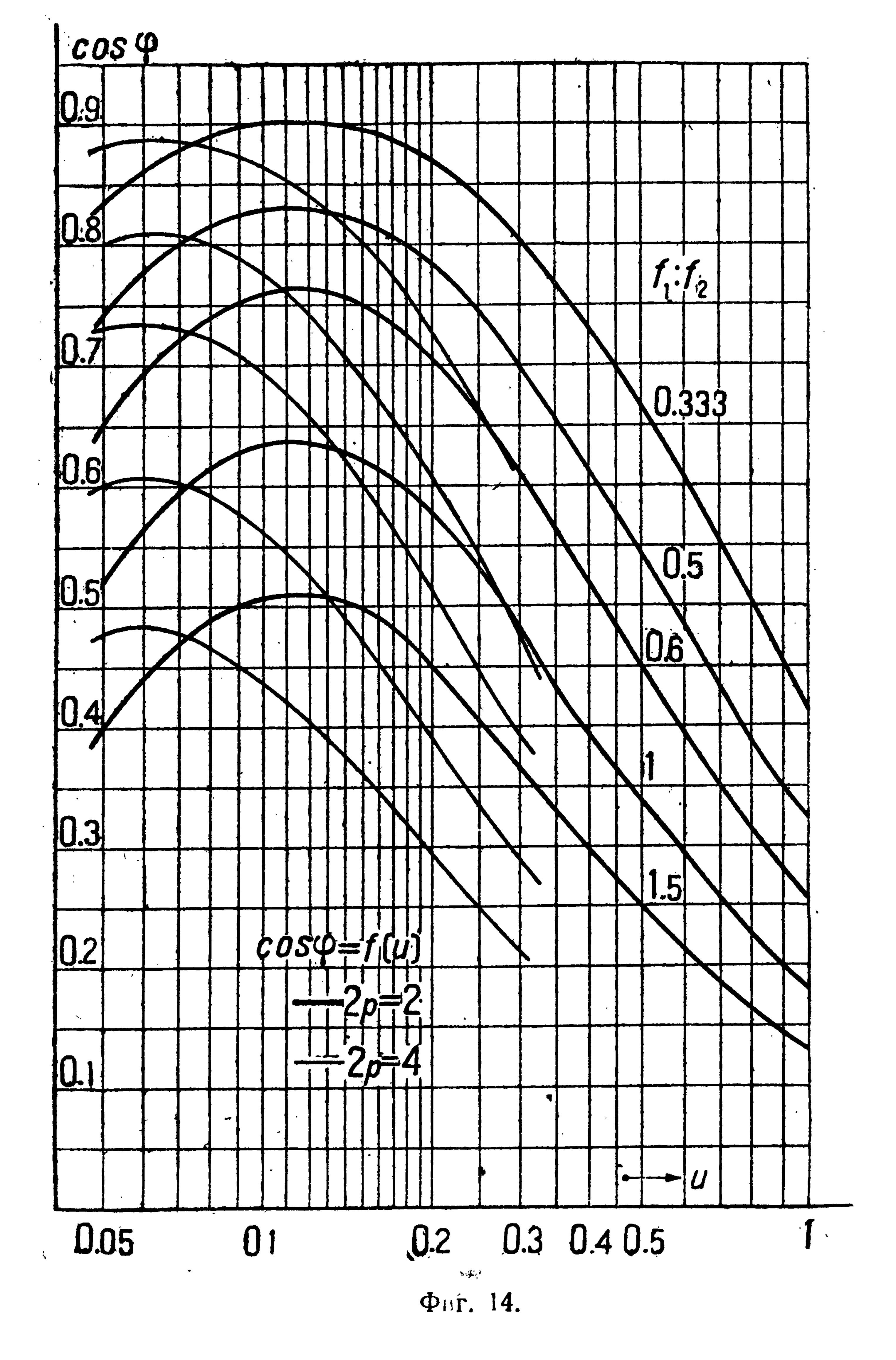
$u=$	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	1
$\operatorname{tg}\varphi=$	1,64	1,31	1,215	1,25	1,4	1,82	2,28	2,77	5,35
$\cos\varphi=$	0,52	0,606	0,635	0,625	0,58	0,481	0,401	0,339	0,184

5. $\frac{f_1}{f_2}=1{,}5,\quad \varepsilon_p=35\%,\quad \frac{\frac{f_1}{f_2}}{1+\frac{\varepsilon_p}{100}}=\frac{1{,}5}{1{,}35}=1{,}11.$

$u=$	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	1
$\operatorname{tg}\varphi=$	2,28	1,82	1,69	1,735	1,94	2,52	3,17	3,84	7,45
$\cos\varphi=$	0,401	0,48	0,51	0,5	0,457	0,369	0,30	6,251	0,133

В таблице III указана зависимость $\cos\varphi=f(u)$ от пяти принятых значений отношения $\frac{f_1}{f_2}$. Эта зависимость показана на фиг. 14 в виде кривых. Деления на оси абсцисс нанесены по логарифмической шкале для того, чтобы иметь возможность точного отсчета в наиболее важном участке от $u=0{,}06$ до $u=0{,}2$.

Для трех значений u, а именно $u=0{,}1$, 0,15 и 0,2 на фиг. 15 показана зависимость коэффициента мощности от отношения $\frac{f_1}{f_2}$. По



Фиг. 14.

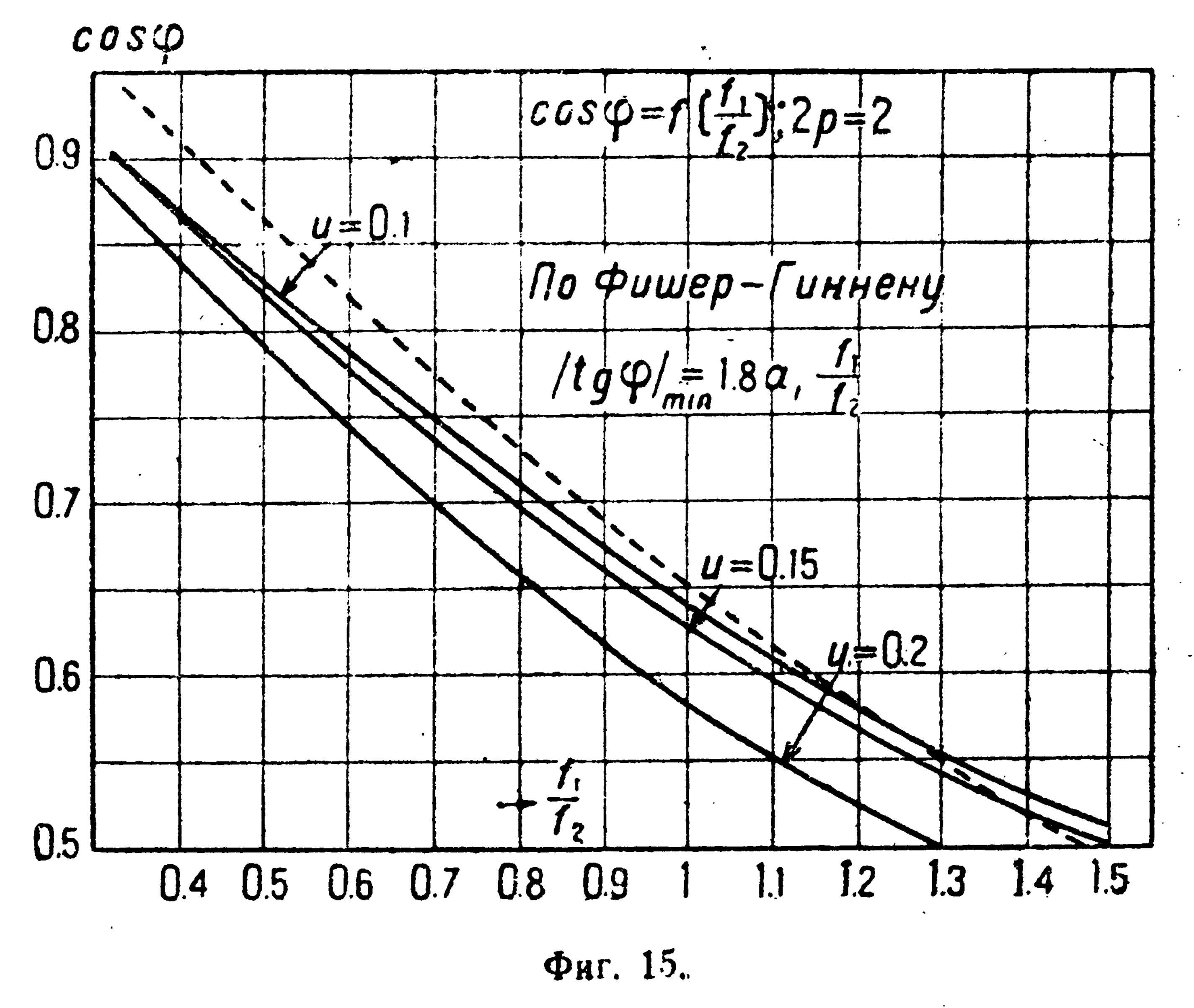
Фишер-Гиннену [1] величина коэфициента мощности приблизительно равна:

$$(\operatorname{tg}\varphi)_{\min} = 1{,}8 \cdot \alpha_l \frac{f_1}{f_2}.$$

[1] E. T. Z., 1909, стр. 48?.

Найденная по этому уравнению кривая $\cos\varphi = f\left(\frac{f_1}{f_2}\right)$ также показана на фиг. 15. Как видно из чертежа, мы имеем для нее хорошее совпадение с кривой для $u = 0,1$. При переходе от $u = 0,1$ к $u = 0,2$ коэфициент мощности уменьшается при $\frac{f_1}{f_2} = 0,5$ от 0,829 до 0,789, т. е. на 4%; при $\frac{f_1}{f_2} = 1$ — от 0,636 до 0,58, т. е. на 5,6%.

Таким образом с точки зрения получения высокого $\cos\varphi$ передаточное число u не должно превышать значения 0,2.



Фиг. 15.

При синхронном числе оборотов мы во всяком случае не должны доходить до

$$w_1 = \frac{w_2}{5},$$

т. е. число витков ротора должно быть не менее чем в пять раз больше числа витков, приходящихся на один полюс статора.

Для нижесинхронной скорости этот тип двигателя строить нельзя; даже для синхронного числа оборотов проектирование их является затруднительным.

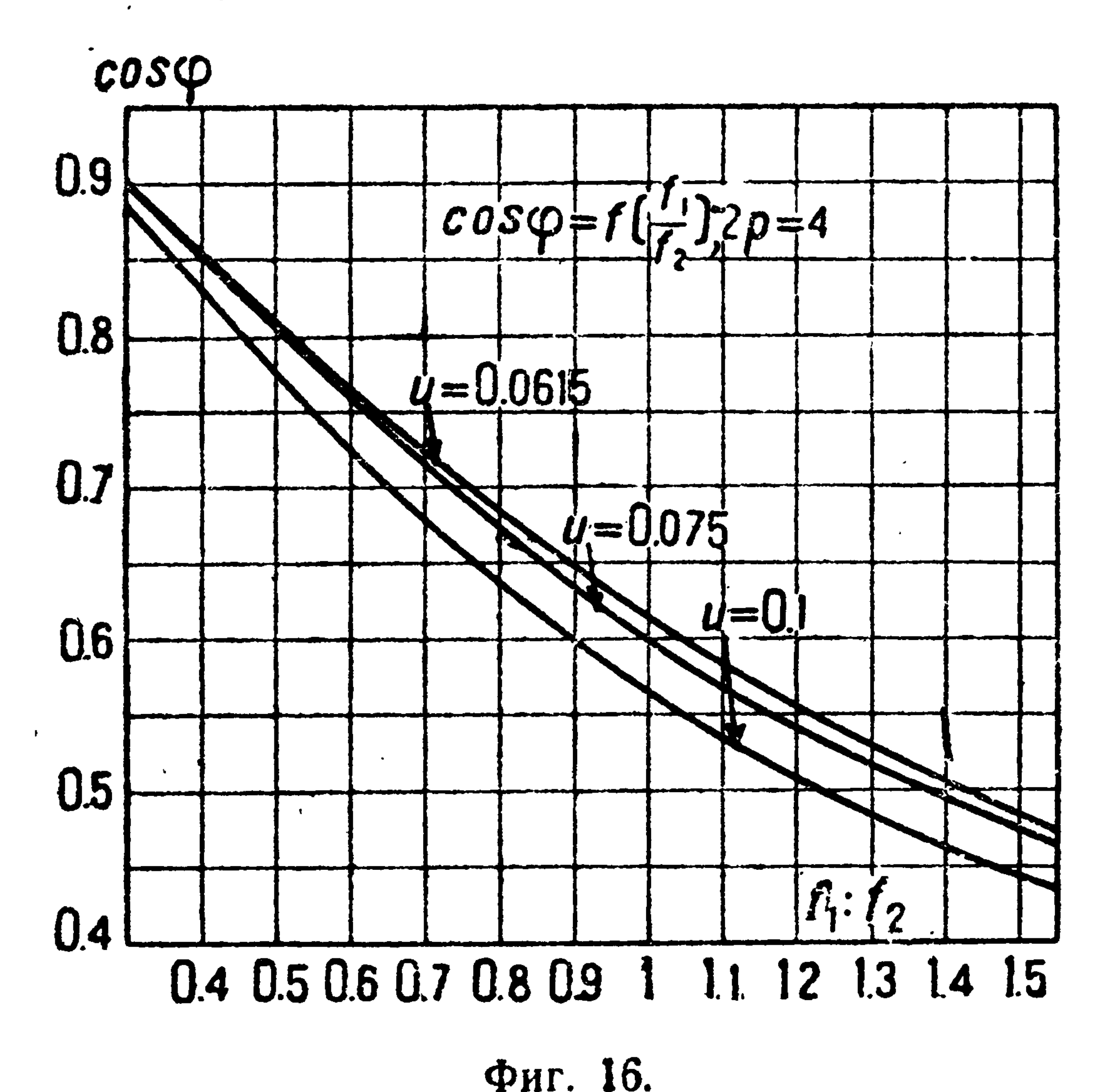
Для четырехполюсного типа согласно фиг. 14 u не должно быть больше чем 0,1, т. е.

$$w_1 \leq \frac{w_2}{10}.$$

На фиг. 16 показана зависимость $\cos\varphi = f\left(\frac{f_1}{f_2}\right)$ для $u = 0{,}0615$, 0,075 и 0,1.

Из чертежа видно, что при уменьшении числа оборотов ротора $\cos\varphi$ значительно падает.

Согласно уравнению (2), вращающий момент пропорционален произведению $\Phi_{y\,max} \cdot I$ и, согласно уравнению (4), $\Phi_{y\,max}$ увеличивается с возрастанием I. Если не принимать во внимание насыщения железа, то увеличение $\Phi_{y\,max}$ совершается пропорционально I. Таким образом с увеличением вращающего момента должны расти ток и магнитный поток.



Фиг. 16.

Согласно уравнениям (3) и (14):

$$\frac{E_w}{1 + \frac{\varepsilon_p}{100}} = \frac{E_k \cdot \cos\varphi}{1 + \frac{\varepsilon_p}{100}} = E_r = \frac{\sqrt{2}}{a} \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8}. \qquad (20)$$

Обозначая для сокращения выражение, заключенное в прямоугольные скобки в формуле (18), через γ, т. е.

$$\gamma = 2p \cdot \pi \cdot \sigma \cdot u + \frac{k_2}{u}, \qquad (21)$$

получим

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\gamma}{1 + \frac{\varepsilon_p}{100}} \cdot \frac{f_1}{f_2},$$

откуда

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f_1^2 \cdot \gamma^2}{\left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right)^2 f_2^2}}}. \qquad (22)$$

Наконец, из уравнений (20) и (22) следует:

$$f_2 = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_p}{100}} \sqrt{\frac{a^2 \cdot E_k^2 \cdot 10^{16}}{2 \cdot w_2^2 \cdot \Phi_{y\,max}^2} - (f_1 \cdot \gamma)^2} \qquad (23)$$

или

$$n = \frac{60}{p\left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right)} \sqrt{\frac{a^2 \cdot E_k^2 \cdot 10^{16}}{2 \cdot w_2^2 \cdot \Phi_{y\,max}^2} - (f_1 \cdot \gamma)^2}. \qquad (24)$$

Пример. Для одного двухполюсного двигателя

$$f_1 = 50 \text{ циклов},$$

$$\varepsilon_p = 25\%,$$

$$E_k = 220 \text{ V},$$

$$w_2 = 1\,080,$$

$$\Phi_{y\,max} = 0{,}142 \cdot 10^6,$$

$$k_2 = \frac{0{,}85}{8\pi \cdot 0{,}65}\left(1{,}25 + 18{,}5 \cdot 2{,}2 \cdot \frac{0{,}1}{10{,}2}\right) = 0{,}086,$$

$$\gamma = 2\pi \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}16 + \frac{0{,}086}{0{,}16} = 1{,}6,$$

$$n = \frac{60}{1{,}25}\sqrt{\frac{220^2 \cdot 10^{16}}{2 \cdot 1080^2 \cdot 0{,}142^2 \cdot 10^{12}} - (50 \cdot 1{,}6)^2} \cong 3000 \text{ об/мин.}$$

Из уравнения 24 видно, что $n = 0$ для

$$\frac{a^2 \cdot E_k^2 \cdot 10^{16}}{2 \cdot w_2^2 \cdot \Phi_{y\,max}^2} = (f_1 \cdot \gamma)^2$$

или для

$$\frac{a \cdot E_k \cdot 10^8}{\sqrt{2} \cdot w_2 \Phi_{y\,max}} = f_1 \cdot \gamma,$$

$$\Phi_{y\,max} = \frac{a \cdot E_k \cdot 10^8}{\sqrt{2} \cdot w_2 \cdot f_1 \cdot \gamma}. \qquad (25)$$

Таким образом в нашем числовом примере $n=0$ для

$$\Phi_{y\,max} = \frac{220\cdot10^8}{\sqrt{2}\cdot1080\cdot50\cdot1,6} = 0,18\cdot10^6.$$

Этому магнитному потоку соответствует ток I, равный 2 А, откуда максимальный момент, согласно уравнению (2а):

$$M_{d\,ср} = \frac{1080\cdot\sqrt{2}}{61,6}\cdot0,18\cdot2,0 = 8,9\ кгсм.$$

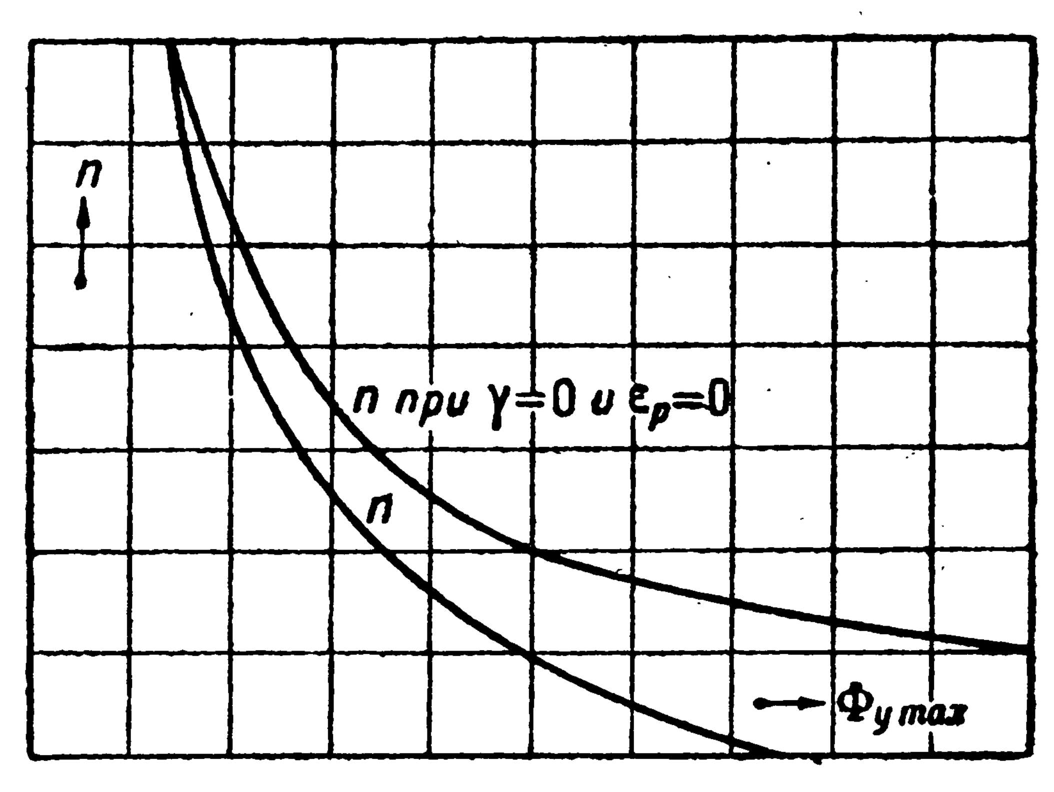
Для покрытия потерь в железе и меди нужно около 3 *кгсм*. Таким образ м в качестве полезного вращающего момента можно использовать приблизительно 6 *кгсм*. При уменьшении момента уменьшается ε_p, равно как и $\Phi_{y\,max}$. При этом число оборотов должно возрасти. Уменьшение γ также увеличивает число оборотов при понижении вращающего момента. Величина γ становится меньше, так как значение δ'' при уменьшении тока все больше и больше приближается к значению δ'.

Если бы $\gamma=0$ и $\varepsilon_p=0$, то согласно уравнению (24) кривая

$$n=f(\Phi_{y\,max})$$

представляла бы собой равностороннюю гиперболу, так как тогда

$$n=\frac{const}{\Phi_{y\,max}}.$$



Фиг. 17.

Благодаря влиянию γ и ε_p уменьшение числа оборотов происходит скорее, чем уменьшение вращающего момента (фиг. 17).

Если нанести n в зависимости от вращающего момента, то мы получим кривую такого же характера. Нашими рассуждениями мы установили, что сериес-двигатель переменного тока имеет такую же характеристику числа оборотов, как и сериес-двигатель постоянного тока.

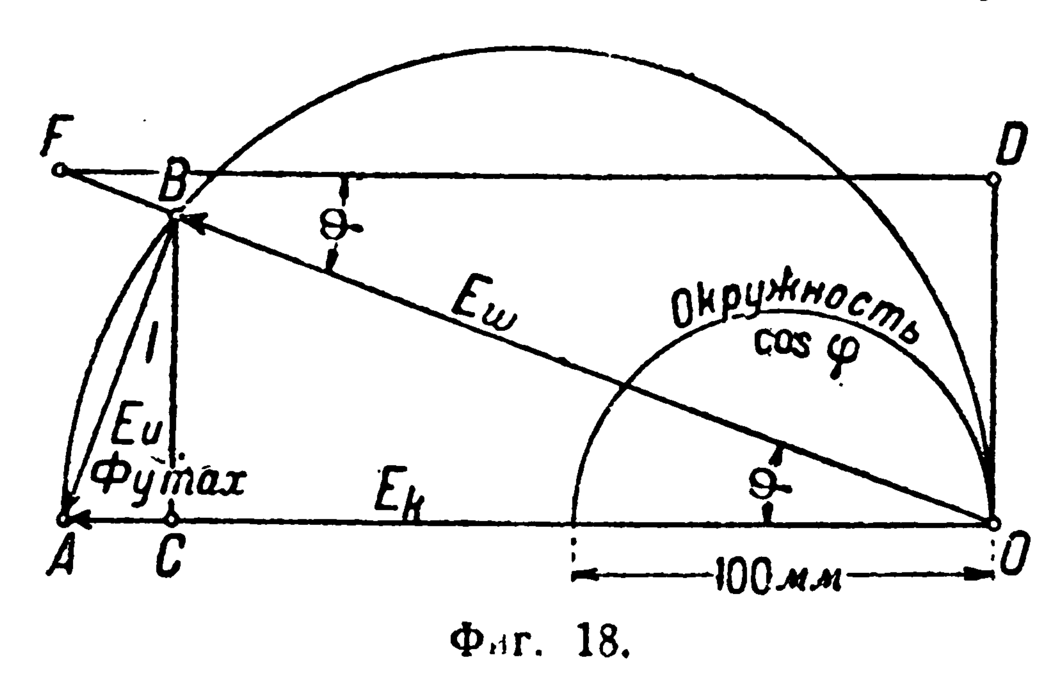
Так как коэфициент мощности уменьшается с понижением числа оборотов, то для одного и того же двигателя увеличение вращающего момента влечет за собой уменьшение коэфициента мощности.

ДИАГРАММА ДВИГАТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Рассмотрим перзоначально идеальный двигатель, без каких бы то ни было потерь, у которого поперечное поле якоря Φ_x целиком уничтожено компенсирующей обмоткой. Тогда обе слагающих напряжения на зажимах, показанные на диаграмме фиг. 13, будут:

$$E_w = E_r = \frac{\sqrt{2}}{a} \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8} \text{ вольт},$$

$$E_{bl} = E_{sl} = 4{,}44 \cdot f_1 \cdot 2p \cdot w_1 \cdot \sigma \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}.$$



Фиг. 18.

Обе составляющих расположены перпендикулярно друг к другу и E_k составляет с током I угол φ. Как уже было указано выше, насыщение железа в этих двигателях ничтожно, и поэтому мы совершим очень небольшую ошибку, если будем пренебре ать насыщением железа и считать кривую намагничивания прямой линией.

В этом случае

$$\Phi_{y\,max} \text{ пропорционально } I,$$

а следовательно

$$E_{bl} \text{ пропорционально } I.$$

Если на фиг. 18 отрезок $OA = E_k$, то

$$OB \equiv E_w,$$

$$BA \equiv E_{bl} \equiv I \equiv \Phi_{y\,max},$$

или:

$$OB \equiv E_k \cos\varphi,$$

$$BA \equiv E_k \sin\varphi \equiv I.$$

Потребляемая мощность составляет:

$$I \cdot E_k \cdot \cos\varphi \equiv E_k^2 \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi.$$

На фиг. 18 это произведение может быть изображено удвоенной площадью OAB.

Так как основание OA треугольника OAB имеет постоянную величину, то его площадь пропорциональна высоте BC. Таким

образом потребляемая мощность может в некотором масштабе изображаться высотой BC прямоугольного треугольника. Для двигателя, не имеющего потерь, отрезок BC одновременно будет представлять собой и полезную мощность. Вращающий момент пропорционален произведению $I \cdot \Phi_{y\,max}$, или

$$M_d \equiv E_k^2 \cdot \sin^2 \varphi,$$

$$M_d \equiv \overline{AB^2}.$$

Из подобия треугольников OAB и ABC следует:

$$\frac{\overline{OA}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}},$$

$$\overline{AB^2} = \overline{OA} \cdot \overline{AC}.$$

Так как $\overline{OA} = E_k = \text{const}$, то $\overline{AC}$ пропорционально $\overline{AB^2}$. Поэтому вращающий момент может быть изображен в некотором масштабе отрезком $\overline{AC}$.

Из уравнения

$$E_w = \frac{\sqrt{2}}{a} \cdot \frac{p}{60} \cdot n \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8}$$

следует, что

$$n = \frac{E_w}{C \cdot \Phi_{y\,max}},$$

где

$$C = \frac{\sqrt{2}}{a} \cdot \frac{p}{60} \cdot w_2 \cdot 10^{-8}.$$

Согласно предыдущему можно написать:

$$n \equiv \frac{E_k \cdot \cos \varphi}{E_k \cdot \sin \varphi} = \operatorname{cotg} \varphi.$$

Проведем параллельно к $\overline{OA}$ на произвольном от нее расстоянии прямую DF. Тогда угол $OFD = \varphi$ и

$$\operatorname{cotg} \varphi = \frac{DF}{OD}.$$

Так как $OD = \text{const}$, то

$$n \equiv DF.$$

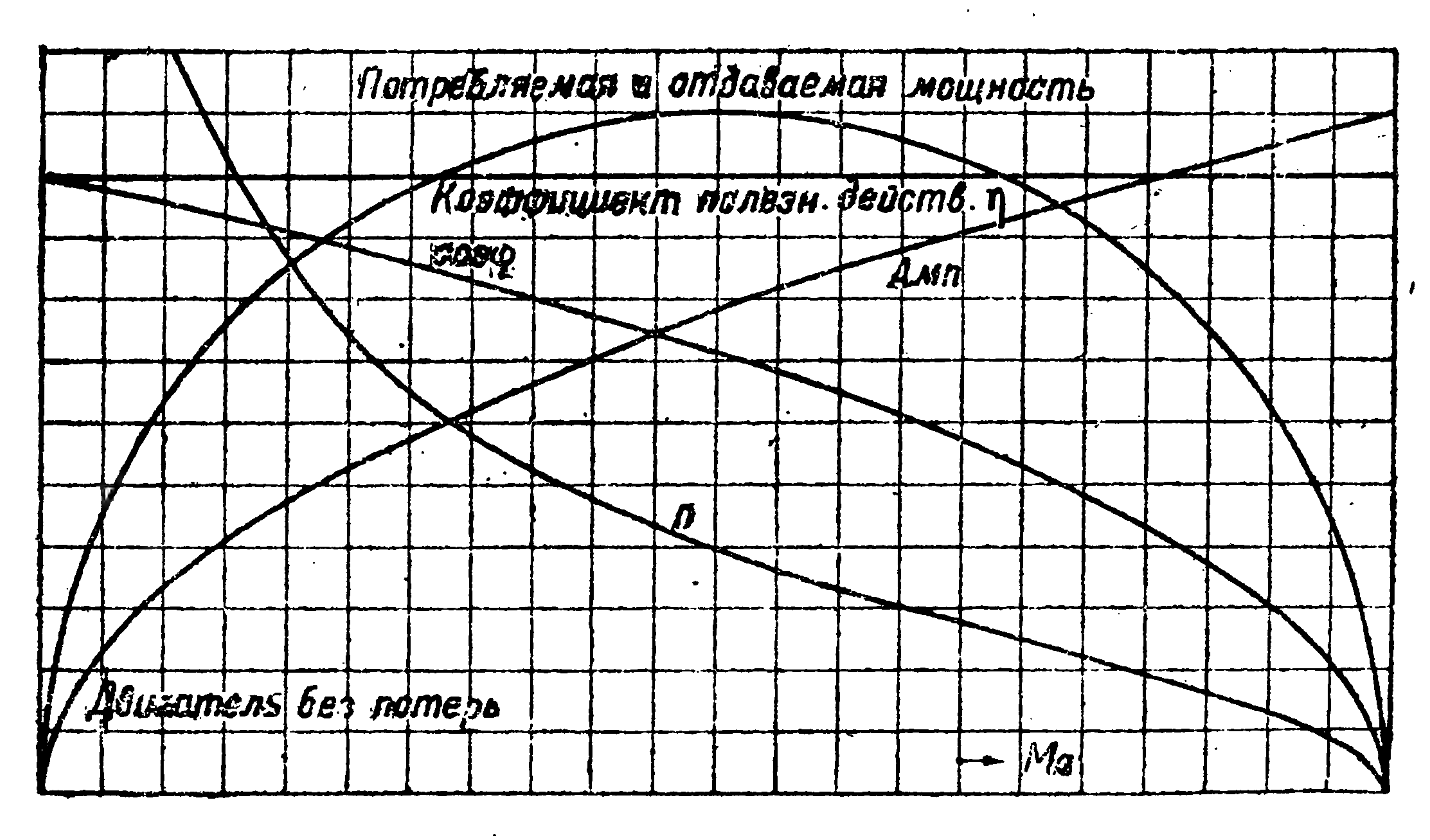
Из фиг. 18 следует, что $\varphi = 45^\circ$ для максимальной мощности при вращающем моменте, равном половине максимального. При $\varphi = 90^\circ$ мы будем иметь максимальный вращающий момент.

На фиг. 19 вращающий момент нанесен по оси абсцисс, а все остальные величины по оси ординат.

Значения всех величин взяты из фиг. 18; число оборотов и ток показаны в половинном масштабе.

Кривые фиг. 19 вначале весьма сходны с кривыми сериес-двигателя постоянного тока, но в дальнейшем характеристики этих двух машин начинают резко отличаться друг от друга, так как для не обладающего сопротивлением двигателя постоянного тока вращающий момент и ток при неподвижном состоянии бесконечно велики, в то время как у двигателя переменного тока эти две величины имеют вполне определенное значение.

Интересно отметить, что для свободного от потерь двигателя переменного тока зависимость мощности от вращающего момента изображается полуокружностью.



Фиг. 19.

У диаграммы действительного двигателя имеются, конечно, некоторые отклонения от диаграммы идеального двигателя, обусловленные прежде всего потерями.

Рассмотрим сперва диаграмму двигателя, у которого приняты во внимание джаулевы потери в обмотках. Активная составляющая E_w состоит в данном случае из двух частей: E_r и ε, где ε представляет собой полную омическую потерю напряжения двигателя.

На фиг. 18 мы имеем:

$$\overline{AC} \equiv \overline{AB}^2,$$

или

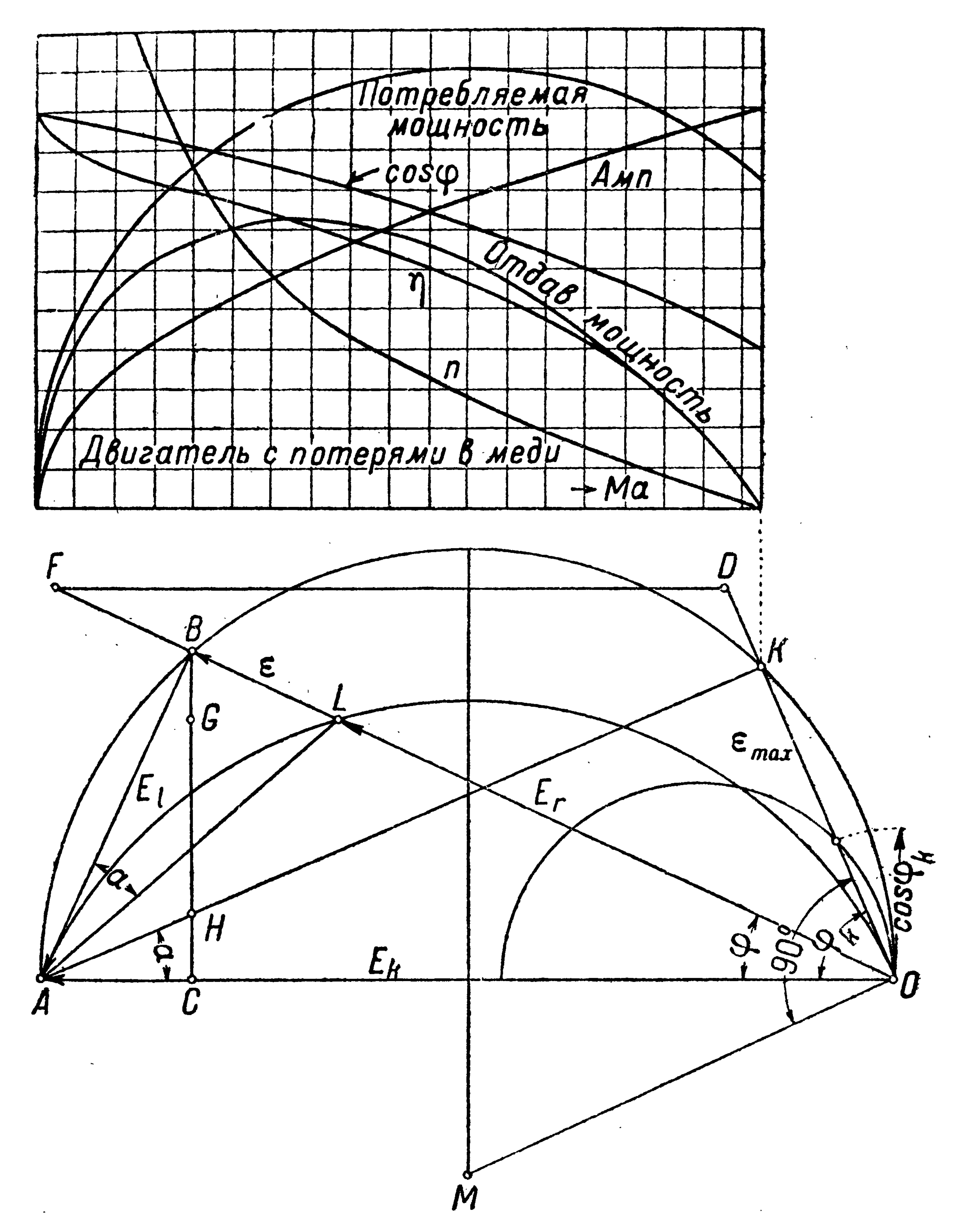
$$\overline{AC} \equiv I^2.$$

Если полное сопротивление в цепи двигателя составляет R ом, то потеря в меди

$$W_k = I^2 R = \overline{AC} \cdot R.$$

Так как $\overline{BC}$ пропорционально мощности, потребляемой двигателем, то отдаваемая мощность может быть найдена путем вычитания

$$W_k = \overline{AC} \cdot R \text{ из } \overline{BC}.$$



Фиг. 20 и фиг. 21.

Отложим (фиг. 20) отрезок $\overline{BG} = \overline{AC} \cdot R$, где $R = \text{const}$.

Тогда отдаваемая мощность выразится отрезком $\overline{CG}$. Потеря растет пропорционально $\overline{AC}$, поэтому необходимо лишь отложить $\overline{CH} = \overline{BG}$ и провести через точки A и H прямую.

Отрезки ординат между OA и AH будут представлять собой джаулевы потери. В точке K, пересечения прямой AH с окружностью, вся подводимая мощность идет на потери, и поэтому полезная мощность равна нулю.

Отрезок OK представляет собой омическое падение напряжения для наибольшего возможного тока AK.

Таким образом в точке K число оборотов должно равняться нулю, в то время как для двигателя без потерь это значение имело место лишь в точке O.

При коротком замыкании здесь угол φ_k уже не равен 90°, а следовательно, $\cos\varphi_k$ не равен нулю; в этом случае $\varphi_k < 90^\circ$, и при неподвижном состоянии имеет место определенный коэфициент мощности $\cos\varphi_k$.

При неподвижном состоянии наш двигатель представляет собой не что иное, как дроссельную катушку, и следовательно, сдвиг фаз будет здесь тем меньше, чем больше омическое сопротивление по сравнению с индуктивным. Для $R = 0$

$$\operatorname{tg}\varphi_k = \frac{\omega L}{R} = \infty,$$

т. е. $\varphi_k = 90^\circ$, как у идеального двигателя.

Отрезки между полуокружностью и прямой AK представляют собой, таким образом, полезную мощность, а отрезки между окружностью и осью абсцисс OA — потребляемую мощность; число оборотов определяется отрезком $\overline{DF}$.

Нам остается еще определить на диаграмме потерю напряжения ε. Активная составляющая $\overline{OB}$ может быть разложена на

$$\overline{OL} = E_r$$

и

$$\overline{LB} = \varepsilon = I \cdot R.$$

Соединяя L с A, найдем:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\overline{LB}}{\overline{\overline{AB}}} = \frac{I \cdot R}{I} = R.$$

Прямоугольный треугольник ABL должен иметь всегда один и тот же угол $\alpha = 90 - \varphi_k$. Для этого точка L должна двигаться по дуге окружности, центр которой M находится в точке пересечения перпендикуляра к OK, восстановленного из O, и перпендикуляра, восстановленного из середины AO. На фиг. 20 и 21 построена диаграмма для $E_w = 200$ V при $E_k = 220$ и $\varepsilon = 20\%$ от E_w, т. е. 40 V.

Теперь в нашей диаграмме остаются непредусмотренными лишь потери в железе (гистерезис и токи Фуко). Железо статора под-

вергается перемагничиванию с частотою f_1 и его потери могут быть найдены, подобно тому как и для трансформатора, по формуле:

$$W_{e1} = 2k_2 \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot \left(\frac{B_{e1}}{10\,000}\right)^2 \cdot G_{e1} \text{ ватт,} \qquad (26)$$

где

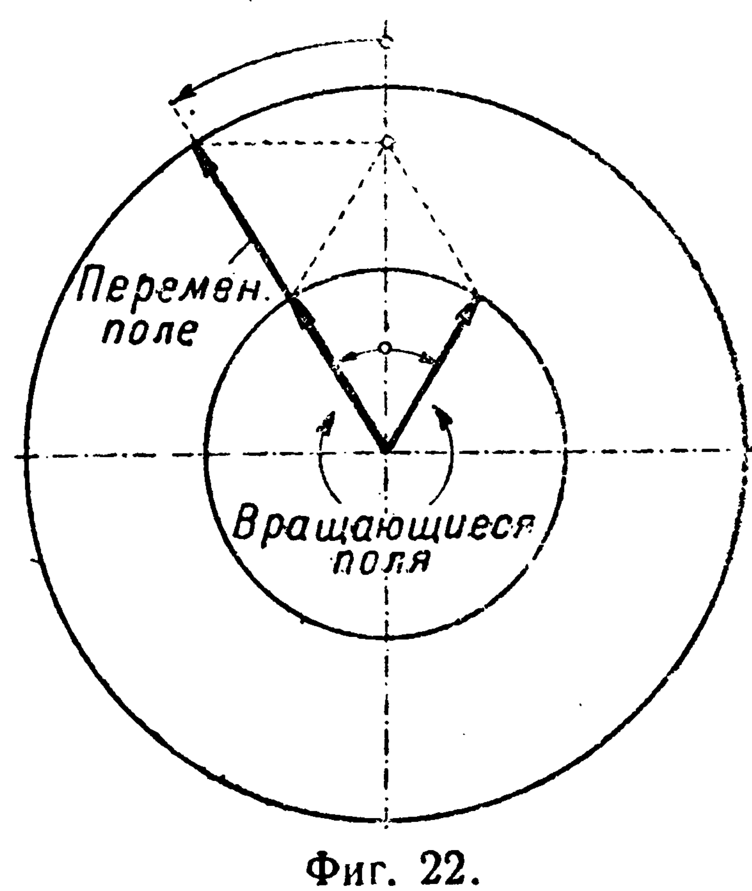
k_2 — число потерь при $f_1 = 50$ и $B_{e1} = 10\,000$ (для нормального динамного железа $k_2 = 3{,}5$ W/*кг*).

G_{e1} — вес железа в килограммах.

Так как обработка железа повышает потери в нем при перемагничивании, то в небольших машинах следует делать 100% прибавку на эти дополнительные потери, чем и объясняется цифра 2, стоящая в нашей формуле.

Для вращающего ротора формула (26) не приемлема, так как здесь каждая частица железа вращается с частотою f_2 в переменном потоке частоты f_1.

Как известно, каждый переменный поток можно заменить двумя потоками, равными по величине и вращающимися с одинаковой скоростью в разные стороны, причем величина каждого из этих потоков равна половине максимального значения переменного поля (фиг. 22).

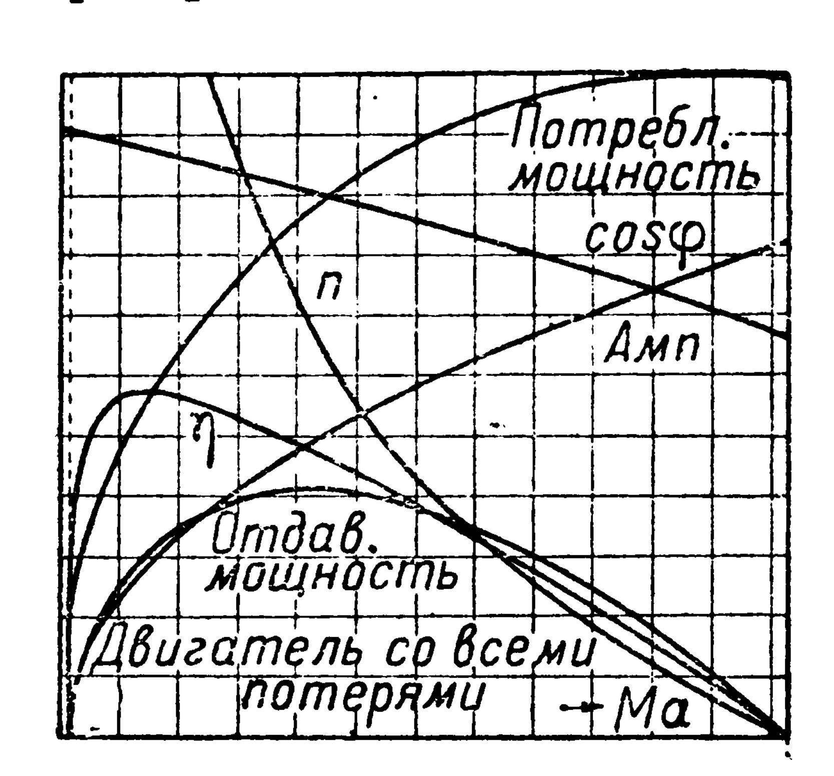


Фиг. 22.

Если, таким образом, при неподвижном роторе потери в железе составляют W_0 ватт, то мы можем представить себе, что $\frac{W_0}{2}$ ватт вызывается правовращающимся потоком и $\frac{W_0}{2}$ ватт — левовращающимся.

Потеря на гистерезис изменяется пропорционально частоте, а потеря на вихревые токи — пропорционально квадрату частоты. Если ротор вращается синхронно, то по отношению к правовращающемуся потоку его относительная скорость равна нулю, и поэтому потеря на гистерезис равна нулю. Поток же, вращающийся влево, перемагничивает ротор с двойной частотой, и поэтому потеря на гистерезис от этого потока будет вдвое больше, чем при неподвижном состоянии, или, другими словами, полная потеря на гистерезис при синхронном вращении ротора имеет точно такую же величину, как и при неподвижном двигателе. Можно показать, что это положение справедливо для любой частоты вращения ротора f_2, так как частота относительного движения ротора

для правовращающегося поля будет $f_1 + f_2$, а для левовращающегося $-f_1 - f_2$ и полная потеря:



$$W_h = \frac{W_{h_0}}{2}\left[\left(1+\frac{f_2}{f_1}\right)^2 + \left(1-\frac{f_2}{f_1}\right)\right] = W_{h_0}.$$

Мы видим, следовательно, что потеря на гистерезис не зависит от скорости вращения ротора.

Фиг. 23 и фиг. 24.

Иначе обстоит дело с потерями на токи Фуко, изменяющимися пропорционально квадрату частоты.

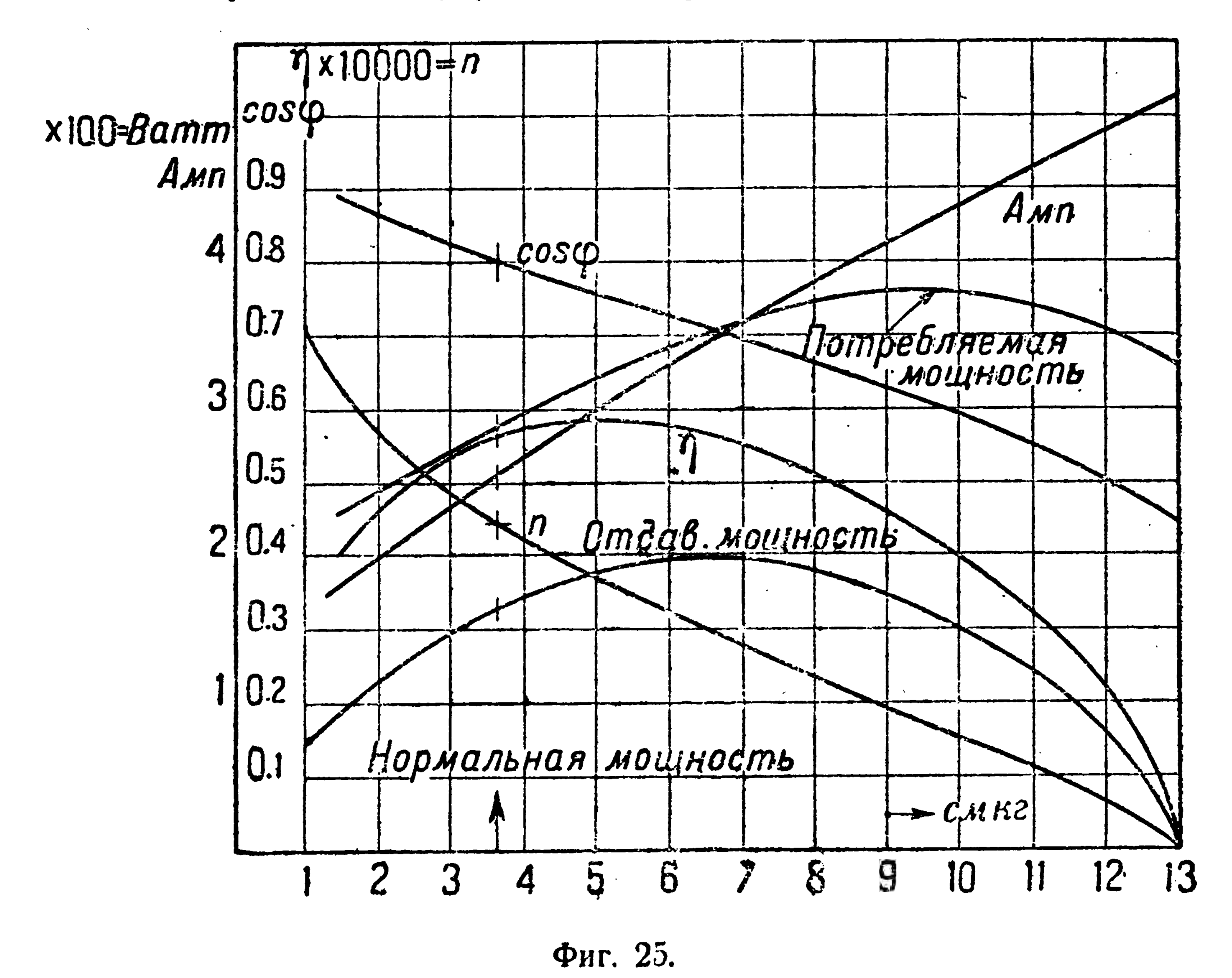
Эта потеря составляет:

$$W_w = \frac{W_{w_0}}{2}\left[\left(1+\frac{f_2}{f_1}\right)^2 + \left(1-\frac{f_2}{f_1}\right)^2\right] = W_{w_0}\left[1+\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2\right].$$

Для синхронного числа оборотов

$$W_w = 2\,W_{w_0}.$$

Для рассматриваемых нами небольших двигателей с большим числом оборотов в минуту размеры ротора невелики, и поэтому



Фиг. 25.

вес железа его значительно меньше, чем у статора. Если поэтому мы будем считать, что полная потеря в железе не зависит от числа оборотов, то ошибка будет весьма небольшой.

Зато это допущение дает нам возможность предусмотреть потери в железе на диаграмме. Так как они пропорциональны квадрату потока, или, что то же, квадрату тока, то с ними можно поступить так же, как и с потерями в меди. Можно написать

$$W_e = I^2 \cdot R_e.$$

На диаграмме, таким образом, ничто не изменится, лишь вместо омического сопротивления R придется взять сопротивление

$$R + R_e = R + \frac{W_e}{I^2}, \quad (27)$$

где W'_e — полные потери в железе.

Если мы, наконец, захотим еще учесть на диаграмме потери трения, то мы должны помнить, что они изменяются пропорционально числу оборотов. Приближенно их можно учесть следующим образом: определяются потери на трение при нормальной нагрузке, прибавляются к потерям в меди и железе и конечная точка суммы потерь соединяется прямой с точкой K. Для частного случая, когда потери в железе равны потерям в меди и потери на трение равны половине потерь в железе, мы получим вместо диаграммы, показанной на фиг. 20, диаграмму, изображенную на фиг. 23. Сравнивая кривые, полученные экспериментальным путем, с кривыми, найденными из диаграммы и показанными на фиг. 24, мы увидим, что кривые тока и потребляемой мощности в обоих случаях отличаются друг от друга, причем в начале экспериментальные кривые расположены выше, чем на фиг. 24. Это объясняется тем, что при больших числах оборотов вблизи холостого хода трение создает заметную нагрузку двигателя, благодаря чему ток возрастает, потери в меди и железе увеличиваются и для своего покрытия требуют большего потребления мощности, чем это предусмотрено диаграммой. На фиг. 25 показаны результаты одного испытания, где ясно заметно описанное явление. В остальном кривые на фиг. 24 и 25 показывают хорошее совпадение.

МАШИНА КАК ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ВНУТРЕННЯЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

Максимальное значение ампервитков ротора, приходящихся на один полюс, определяется из уравнения:

$$AW_{R\,max} = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w_2}{2a \cdot 2p}.$$

Ампервитки, приходящиеся на один полюс статора:

$$AW_s = \sqrt{2} \cdot I \cdot w_1.$$

Под краем полюса ампервитки ротора составляют:

$$AW_R = a \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w_2}{2a \cdot 2p}.$$

Поэтому

$$\frac{AW_s}{AW_R} = 2 \cdot \frac{2p}{a} \cdot u. \quad (28$$

При $2p=2$, $a=\frac{2}{3}$, $u=\frac{1}{6}$

$$\frac{AW_s}{AW_R}=2\cdot\frac{2}{\frac{2}{3}}\cdot\frac{1}{6}=1.$$

Для правильного функционирования машины в качестве двигателя постоянного тока AW_s должно быть больше, чем AW_R. В среднем это отношение должно составлять

$$\frac{AW_s}{AW_R}=1{,}2\div1{,}3.$$

Таким образом при питании двигателя от постоянного тока и при величине $a=\frac{2}{3}$

$$I\cdot w_1=(1{,}2\div1{,}3)\frac{Iw_2}{2a\cdot2p}\cdot a$$

или

$$u=\frac{1{,}2\div1{,}3}{2}\cdot\frac{a}{2p}. \qquad (29)$$

Тогда для двухполюсной машины

$$u=(0{,}6\div0{,}65)\frac{2}{3\cdot2}=0{,}2\div0{,}22.$$

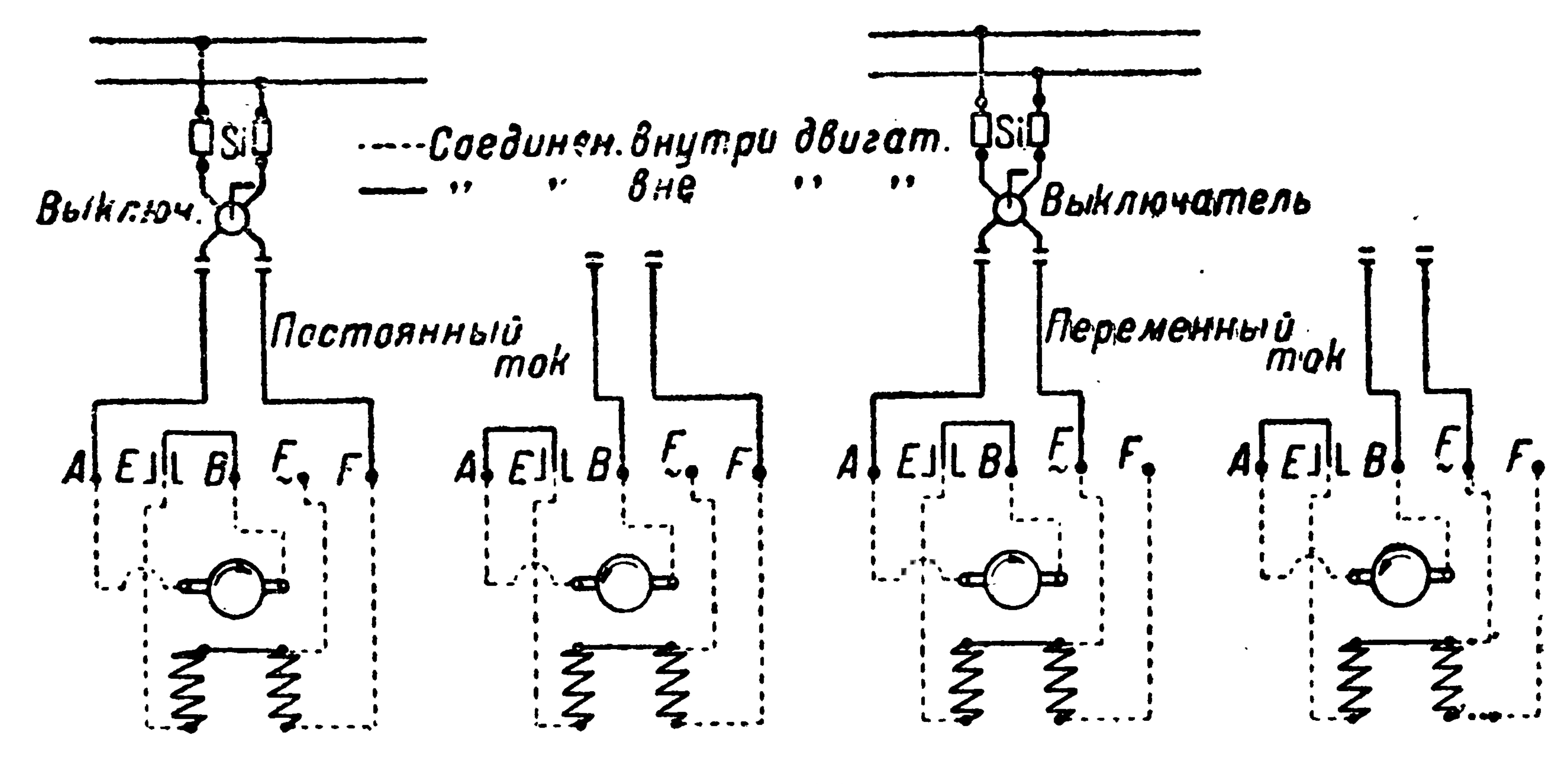
Итак, при питании постоянным током величина u не должна быть меньше 0,2, при питании же переменным током, с точки зрения получения высокого коэфициента мощности, величина u для двухполюсных машин при синхронной скорости не должна быть выше 0,15÷0,16.

Это противоречие требует при питании постоянным током наличия дополнительной статорной обмотки, работающей лишь в том случае, когда машина приводится во вращение от сети постоянного тока. При питании от переменного тока эта обмотка остается в бездействии, и, таким образом, обмоточное пространство статора является вполне использованным лишь при питании от постоянного тока. Схема двигателя с двумя статорными обмотками на полюс показана на фиг. 26.

Отношение $\frac{AW_s}{AW_R}=1{,}2\div1{,}3$ у двигателя постоянного тока необходимо потому, что при преобладании ампервитков ротора, благодаря поперечному потоку ротора, может возникнуть результирующее распределение поля, показанное на фиг. 27, в то время как нормальное распределение поля показано на фиг. 28. В слу-

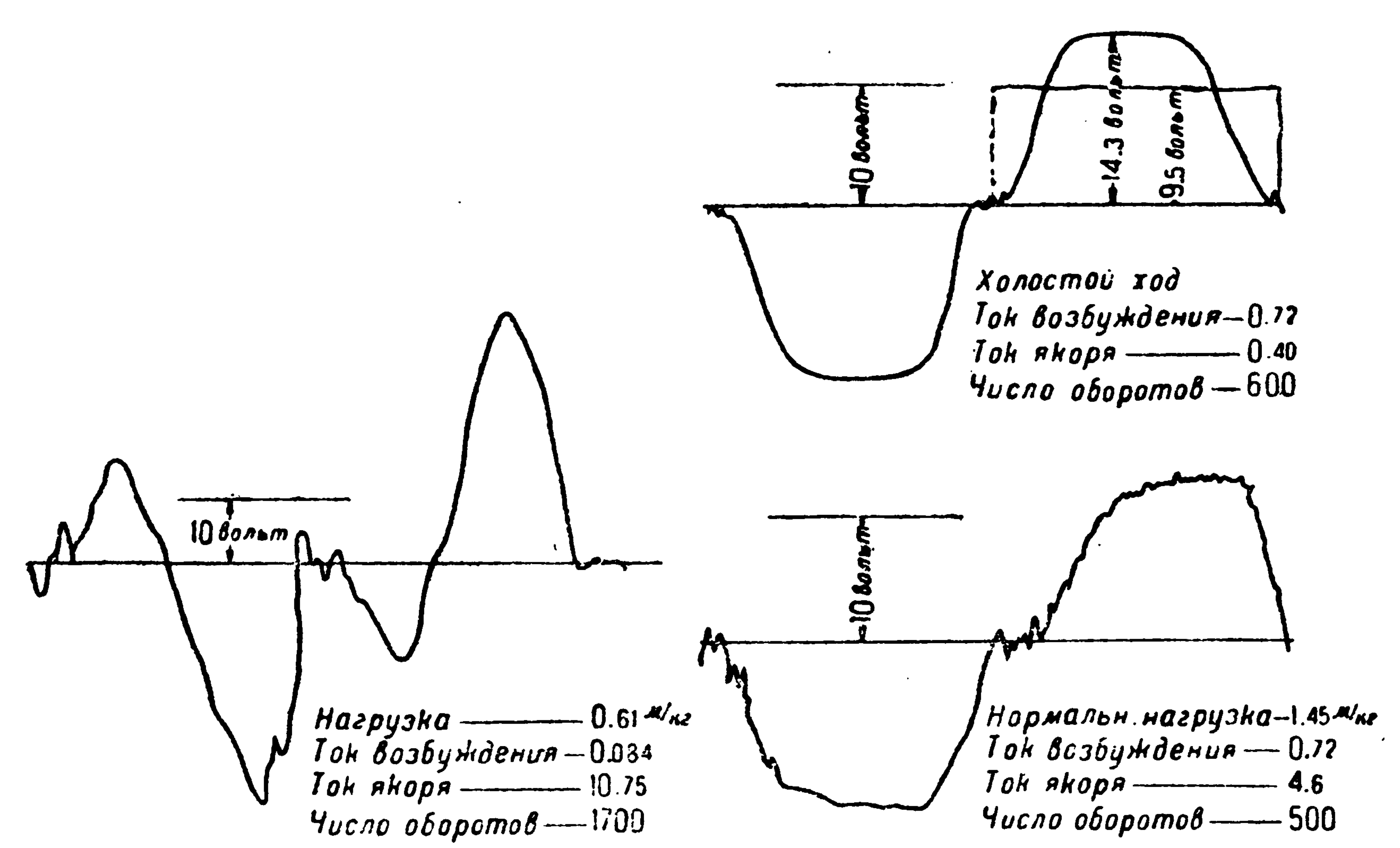
чае, когда распределение поля имеет вид, как на фиг. 27, не может быть достигнута безыскровая коммутация.

При питании от переменного тока коэфициент полезного дей



Фиг. 26.

ствия машин меньше, чем при питании от постоянного тока, благодаря чему, а также еще и наличию коэфициента мощности, ток в обмотке ротора в первом случае значительно больше, чем во



Фиг. 27 и фиг. 28.

втором. Другими словами, обмотка ротора полностью используется лишь при работе на переменном токе. Отсюда становится совершенно очевидно, что размеры таких универсальных двигателей

больше, чем двигателей постоянного тока при одной и той же скорости вращения. Вместо применения дополнительной статорной обмотки можно так сконструировать обмотку статора, чтобы при постоянном токе обе ее половины соединялись последовательно, а при переменном токе параллельно. Однако и в этом случае обмотка статора будет использована полностью при переменном токе лишь в том случае, если этот переменный ток в два раза больше, чем постоянный.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ РОТОРА

Как мы видели выше, активная составляющая напряжения

$$E_w = E_r + \varepsilon = \left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right) \cdot E_r.$$

Если P обозначает полезную мощность в ваттах, то потребляемая мощность

$$\frac{P}{\eta} = E_k \cdot I \cdot \cos\varphi = E_w \cdot I,$$

$$\frac{P}{\eta}\left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right) \cdot I \cdot E_r.$$

Подставляя сюда уравнение (7), получим:

$$\frac{P}{\eta} = \left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right) \cdot I^2 \cdot k_1 \cdot u \cdot f_2 \cdot \tau_p \cdot l \cdot \left(\frac{w_2}{a}\right)^2 \cdot 10^{-8},$$

$$f_2 = \frac{2pn}{120},$$

$$AS \cdot 2p \cdot \tau_p = \frac{w_2}{a} \cdot I,$$

$$\frac{P}{\eta} = \left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right) \cdot AS^2 (2p)^3 \cdot \tau_p^3 \cdot k_1 \cdot u \cdot \frac{n}{120} \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ ватт.}$$

Полагая для сокращения

$$AS^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right) \cdot (2p)^3 \cdot k_1 \cdot u \cdot 10^{-8}}{120} = C, \tag{30}$$

найдем, что

$$\frac{P}{\eta} = C \cdot \tau_p^3 \cdot l \cdot n, \tag{31}$$

$$\tau_p^3 \cdot l = \frac{P}{\eta \cdot C \cdot n}. \tag{32}$$

Подставляя уравнение (5) в формулу (30), получим:

$$C = \frac{\left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right)(2p)^3 \cdot 8 \cdot \pi \cdot a_i \cdot u}{10 \cdot \delta'' \cdot 120} \cdot AS^2 \cdot 10^{-8},$$

$$a_i = \frac{2}{3}, \quad C = 0{,}014 \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right)(2p)^3 \frac{u}{\delta''} \cdot AS^2 \cdot 10^{-8}. \qquad (30a)$$

Таким образом коэфициент использования C пропорционален передаточному числу u; чем больше взято u, тем меньше получаются размеры машины.

Чем больше воздушный промежуток и насыщение железа, тем размеры машины больше, и они становятся тем меньше, чем больше линейная нагрузка AS. Последняя оказывает весьма большое влияние, так как она входит в формулу в квадрате. При увеличении омического падения напряжения размеры машин уменьшаются.

Численный пример. Пусть

$$P = 100\ \text{W},$$
$$\eta = 55\%,$$
$$f_1 = 50\ \text{циклов},$$
$$n = 3000\ \text{об/мин},$$
$$\delta'' = 0{,}1\ \text{см},$$
$$AS = 80,$$
$$\varepsilon_p = 25\%,$$
$$2p = 2.$$

Тогда, согласно формуле (30a):

$$C = 0{,}014 \cdot 1{,}25 \cdot 8 \cdot \frac{80^2}{0{,}1} \cdot 10^{-8} \cdot u = 90 \cdot 10^{-6} \cdot u,$$

$u =$	$0{,}1,$	$0{,}2,$
$C =$	$9 \cdot 10^{-6},$	$18 \cdot 10^{-6},$
$\tau_p^3 \cdot l =$	$6800,$	$3400,$
$l =$	$5,$	$5,$
$\tau_k =$	$11,$	$8{,}8,$
$D =$	$7,$	$5{,}6,$
$D^2 \cdot \pi \cdot l =$	$770,$	$490.$

Таким образом для $u = 0{,}2$ объем ротора составляет лишь 64% от объема ротора при $u = 0{,}1$, другими словами, при $u = 0{,}2$

машина получается значительно дешевле. Если спроектировать машину с $2p=4$ при синхронном числе оборотов $n=1500$ об/мин и при $\varepsilon_p=35\%$, получаются следующие значения:

$$C=0{,}014\cdot 1{,}35\cdot 64\cdot\frac{80^2}{0{,}1}\cdot 10^{-8}\cdot u=775\cdot 10^{-6}\cdot u,$$

$u=0{,}062,$	$u=0{,}124,$
$C=48\cdot 10^{-6},$	$96\cdot 10^{-6},$
$\tau_p^3\cdot l=2500,$	$1250,$
$l=5,$	$5,$
$\tau_p=7{,}95,$	$6{,}3,$
$D=10,$	$8,$
$D^2\cdot\pi\cdot l=1570,$	$1000=64\%.$

Размеры могут быть еще несколько уменьшены, так как при больших диаметрах может быть выбрана большей линейная нагрузка AS.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ AS

Величину линейной нагрузки AS можно выразить через плотность тока Δ_2, коэфициент заполнения впадины f_k — через отношение — $\frac{\text{ширина впадины}}{\text{зубцовый шаг}}$ для середины высоты впадины v_n и отношение — $\frac{\text{высота впадины}}{\text{диаметр}}=\frac{h_n}{D}$.

Для зубцов, ограниченных параллельными плоскостями (фиг. 29), чаще всего встречающихся у малых машин:

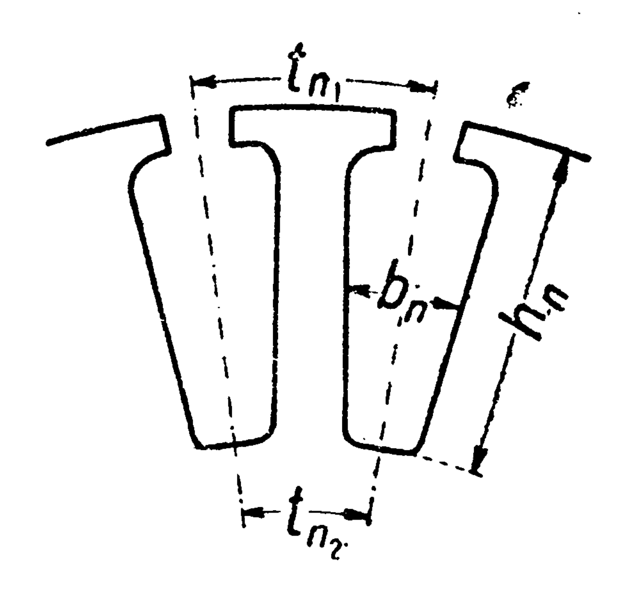
$$\frac{h_n}{D}=\frac{1}{5}=\frac{d_w}{D},$$

$$v_n=0{,}65;$$

здесь d_w — диаметр вала.

Выше мы имели

$$D\cdot\pi\cdot AS=2\cdot w_2\cdot\frac{I}{2a},$$



Фиг. 29.

далее

$$\Delta_2=\frac{I}{2a\cdot q_2},$$

где q_2 — сечение роторного проводника.

Если число впадин составляет z_n, то в каждой впадине уложено $\frac{2w_2}{z_n}$ проводников. Поперечное сечение меди во впадине

$$\frac{2w_2}{z_n} \cdot q_2 \text{ мм}^2.$$

Согласно фиг. 29 площадь впадины приблизительно составляет

$$F_n = h_n \cdot b_n \cdot 100 \text{ мм}^2,$$

где h_n и b_n выражены в *см*.

Коэфициент заполнения впадины:

$$f_k = \frac{\frac{2w_2}{z_n} \cdot q_2}{100 \cdot h_n \cdot b_n},$$

откуда

$$w_2 = \frac{z_n}{q_2} \cdot \frac{100}{2} \cdot f_k \cdot h_n \cdot b_n;$$

далее

$$D \cdot \pi \cdot AS = 2 \cdot \frac{z_n}{q_2} \cdot \frac{100}{2} \cdot f_k \cdot h_n \cdot b_n \cdot \Delta_2 \cdot q_2,$$

или

$$AS = \frac{100 \cdot f_k \cdot h_n \cdot b_n \cdot \Delta_2}{\frac{D \cdot \pi}{z_n}}.$$

Так как

$$\frac{D \cdot \pi}{z_n} = t_{n_1},$$

где t_{n_1} — зубцовый шаг на наружной поверхности ротора, то можно написать:

$$AS = 100 \cdot f_k \cdot h_n \cdot \Delta_2 \cdot \frac{b_n}{t_{n_1}}.$$

Отношение

$$v_n = \frac{b_n}{\frac{t_{n_1} + t_{n_2}}{2}} = \frac{2\,b_n}{t_{n_1} + t_{n_2}},$$

$$t_{n_1} = \frac{D \cdot \pi}{z_{n_1}},$$

$$t_{n_2} = \frac{(D - 2h_n) \cdot \pi}{z_n},$$

$$\frac{t_{n_1}}{t_{n_2}} = \frac{D}{D - 2h_n} = \frac{1}{1 - 2\frac{h_n}{D}}.$$

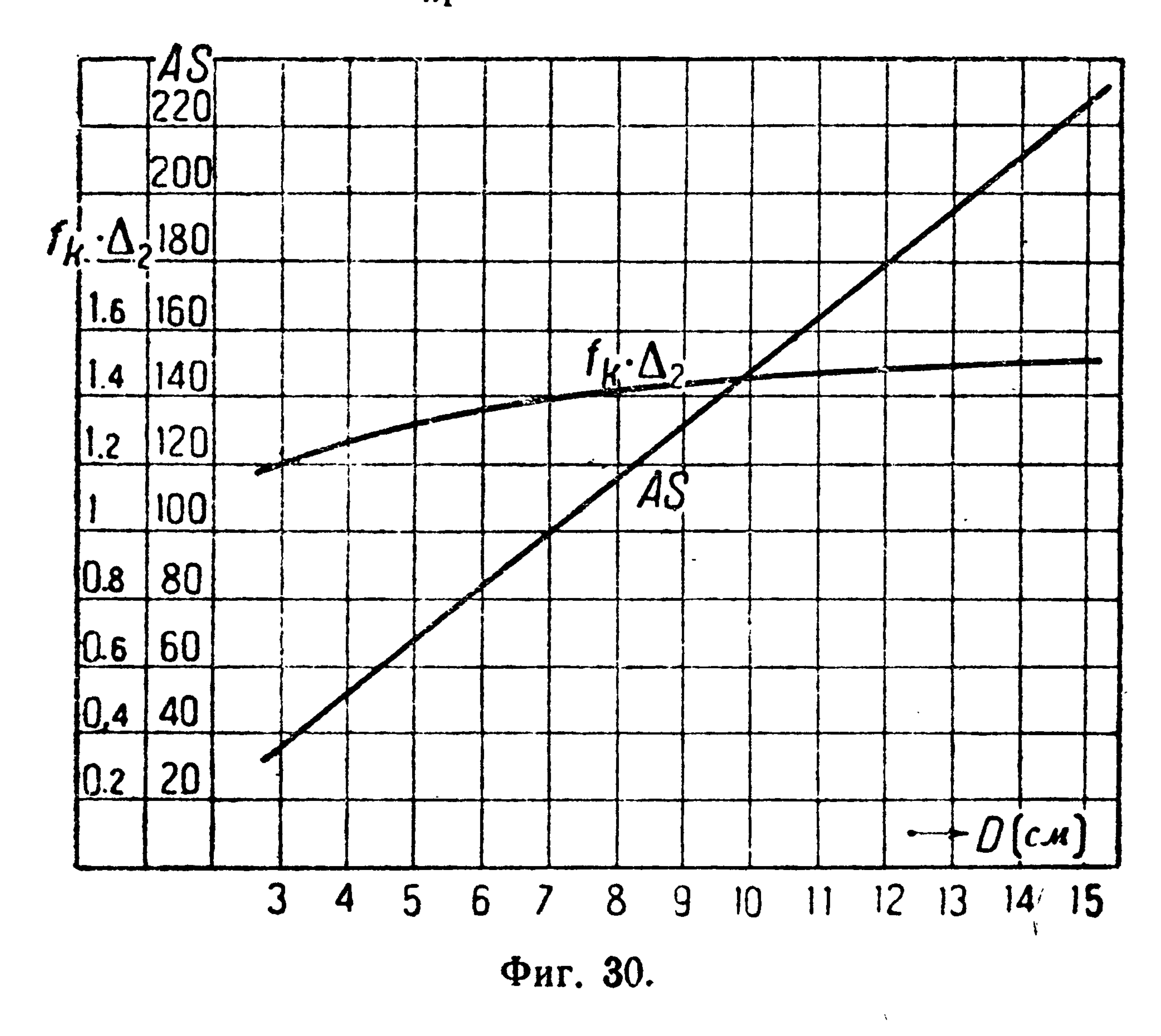
Подставляя

$$t_{n_2} = t_{n_1}\left(1 - 2\frac{h_n}{D}\right),$$

получим:

$$v_n = \frac{b_n}{t_{n_1}\left(1 - \frac{h_n}{D}\right)},$$

$$\frac{b_n}{t_{n_1}} = v_n\left(1 - \frac{h_n}{D}\right)$$



Фиг. 30.

и

$$AS = 100 \cdot f_k \cdot \Delta_2 \cdot D \cdot v_n \cdot \frac{h_n}{D}\left(1 - \frac{h_n}{D}\right). \tag{33}$$

Подставляя сюда приведенные выше численные значения, получим:

$$AS = 10 \cdot f_k \cdot \Delta_2 \cdot D. \tag{34}$$

При увеличении диаметра f_k увеличивается, а Δ_2 уменьшается. Их произведение для диаметров от 3 до 15 *см* составляет $1{,}2 \div 1{,}5$. На фиг. 30 показана зависимость величин $f_k \cdot \Delta_2$ и AS от диаметра D

В численном примере для $2p = 4$, приведенном на стр. 40, согласно фиг. 30, следовало взять $AS \cong 100$ вместо $AS = 80$. В этом случае мы имели бы:

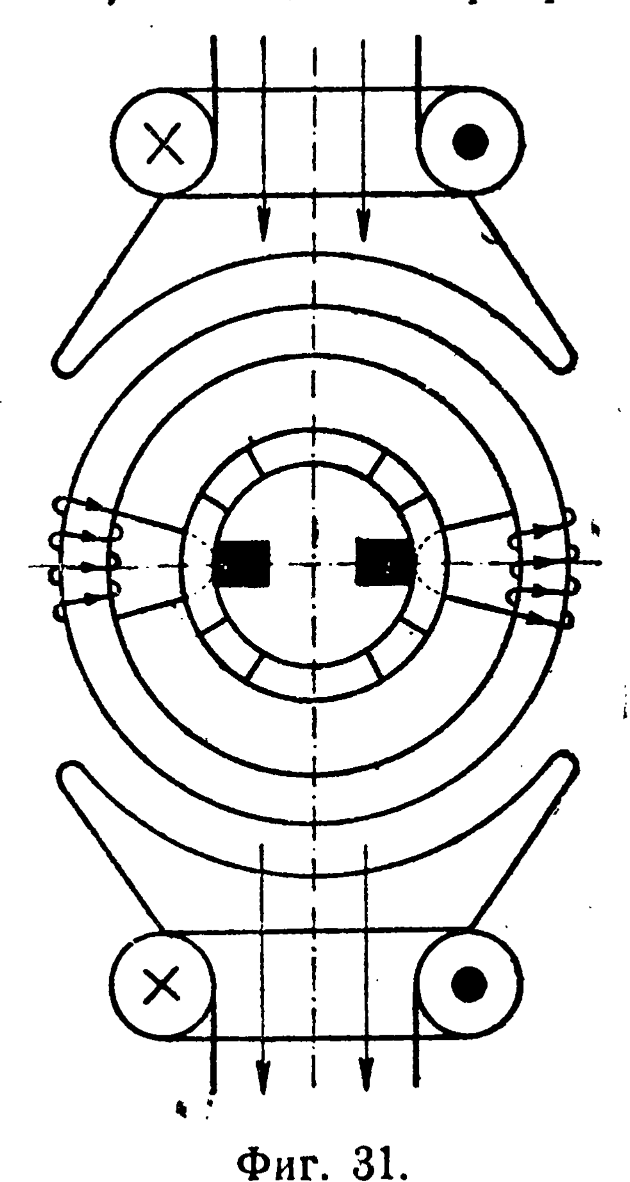
$$C = 1530 \cdot 10^{-6} \cdot u,$$
$$u = 0{,}062, \qquad\qquad 0{,}124,$$

$$C = 95 \cdot 10^{-8}, \qquad 190 \cdot 10^{-6},$$
$$\tau_p^3 \cdot l = 1280, \qquad 640,$$
$$l = 5, \qquad 5,$$
$$\tau_p = 6{,}35, \qquad 5.$$
$$D = 8{,}1, \qquad 6{,}4$$
$$D^2 \cdot \pi \cdot l = 1030, \qquad 645 = 63\%.$$

Таким образом с помощью фиг. 30 и уравнений (30а) и (32) можно легко подсчитать главные размеры ротора.

ТРАНСФОРМАТОРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРА

Если ширина щетки в тангенциальном направлении настолько мала, что щетка перекрывает одновременно максимум две пластины, то при коммутации в коротком замыкании будут находиться витки лишь одной катушки (фиг. 31). Эта катушка вместе с обмоткой статора образует трансформатор, так как поток Φ_y охватывается также $\frac{w_2}{K}$ витками короткозамкнутой катушки. Индуктированная в катушке э. д. с.



Фиг. 31.

$$e_t = 4{,}44 \cdot f_1 \cdot \frac{w_2}{K} \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (35)$$

Э. д. с. e_t должна быть возможно меньшей, для того чтобы искрение на коллекторе оставалось в допускаемых границах. Для малых моторов эта величина не должна превосходить 6÷8 V. Если ширина щетки $b > \beta$, но меньше 2β, то e_t получается вдвое больше, чем следует из формулы (35), так как при этом (фиг. 32) в коротком замыкании находится $2\frac{w_2}{K}$ витков.

У малых моторов поэтому является безусловно необходимым выбирать $b \lesseqgtr \beta$, так как число витков, приходящееся на одну пластину, $\frac{w_2}{K}$ относительно велико. Деля уравнение (35) на уравнение (3), найдем:

$$\frac{e_t}{E_r} = \frac{4{,}44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8}}{\frac{\sqrt{2}}{a} \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot K \cdot \Phi_{y\,max} \cdot 10^{-8}},$$

$$\frac{e_t}{E_r} = \frac{\pi \cdot a}{K}\left(\frac{f_1}{f_2}\right).$$

Таким образом число коллекторных пластин должно иметь величину:

$$K = \pi \cdot a \left(\frac{f_1}{f_2}\right)\frac{E_r}{e_t}. \tag{36}$$

Фиг. 32.

Если принять, что в среднем должно быть $e_t = 2\pi$ вольт, то наименьшее число коллекторных пластин:

$$K_{min} = a\left(\frac{f_1}{f_2}\right)\frac{E_r}{2}. \tag{36a}$$

Из уравнения (36) видно большое влияние отношения частот на величину коллектора. Сверхсинхронная скорость вращения обусловливает таким образом малое число коллекторных пластин, а следовательно, и малый диаметр коллектора. Для того чтобы при заданном отношении $\frac{f_1}{f_2}$ коэфициент мощности был возможно выше, необходимо, чтобы э. д. с. вращения была большой, что увеличивает стоимость коллектора. Короткозамкнутые щетками витки ротора оказывают магнитное влияние на возбуждение статора.

Так как статорная обмотка и короткозамкнутые витки ротора образуют трансформатор, то мы можем воспользоваться в этом случае диаграммой трансформатора, показанной на фиг. 33.

Фиг. 33.

Под влиянием трансформаторного напряжения e_t в короткозамкнутой цепи, имеющей сопротивление ρ, возникает ток:

$$I_t = \frac{e_t}{\rho}.$$

Для того чтобы получить полный ток статорной обмотки I надо к намагничивающему току $I_m = I$ прибавить еще геометрически ток I_t.

Увеличение тока в статорной обмотке вследствие магнитного влияния короткозамкнутых витков выразится, таким образом, отношением $\frac{I_1}{I}$.

Ампервитки одной короткозамкнутой катушки:

$$AW_{R1} = \sqrt{2} \cdot I_t \cdot \frac{w_2}{K},$$

а для всех $2p$ катушек:

$$AW_R = \sqrt{2} \cdot I_t \cdot \frac{w_2}{K} \cdot 2p,$$

$$AW_R = \sqrt{2} \cdot \frac{w_2^2}{K} \cdot 2p \frac{E_{S1}}{K \cdot w_1 \cdot \rho \cdot \sigma}. \quad (37)$$

Ампервитки $2p$ полюсов статора:

$$AW_S = 2p \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot w_1. \quad (38)$$

Если вместо токов складывать соответствующие ампервитки, то из диаграммы фиг. 33 следует:

$$AW_1 = \sqrt{AW_S^2 + AW_R^2},$$

$$AW_1 = AW_S \sqrt{1 + \left(\frac{AW_R}{AW_S}\right)^2}$$

Разделив уравнение (37) на (38), получим:

$$\frac{AW_R}{AW_S} = \frac{w_2^2}{w_1^2 \cdot K^2 \cdot \sigma \cdot \rho \cdot 2p} \cdot \left(\frac{E_{S1}}{I}\right),$$

$$\frac{E_{S1}}{I} = \frac{4{,}44 \cdot f_1 \cdot 2p \cdot w_1^2 \cdot \sigma \cdot 10^{-8} \cdot a_l \cdot \tau_p \cdot l \cdot 4\pi \cdot \sqrt{2}}{10 \cdot \delta''},$$

$$\frac{AW_R}{AW_S} = \frac{4{,}44 \cdot f_1 \cdot w_2^2 \cdot a_l \cdot \tau_p \cdot l \cdot 4\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{-8}}{10 \cdot \delta'' \cdot K^2 \cdot \rho} =$$

$$= \frac{5{,}2 \cdot \tau_p \cdot l \cdot f_1 \cdot w_2^2 \cdot 10^{-8}}{\delta'' \cdot \rho \cdot K^2},$$

$$\frac{AW_1}{AW_S} = \frac{I_1}{I} = \sqrt{1 + \left[\frac{5{,}2 \cdot \tau_p \cdot l \cdot f_1}{10^8 \cdot \delta'' \cdot \rho}\left(\frac{w_2}{K}\right)^2\right]^2}. \quad (39)$$

Пример. Пусть

$$\tau_p \cdot l = 10{,}2 \cdot 5{,}3 = 54 \text{ см}^2,$$
$$f_1 = 50 \text{ циклов},$$
$$\delta'' = 0{,}1 \text{ см},$$
$$\frac{w_2}{K} = \frac{1080}{54} = 20,$$
$$\rho = 2{,}0 \text{ ом}.$$

Тогда:
$$\frac{I_1}{I} = \sqrt{1 + \left(\frac{5{,}2 \cdot 54 \cdot 50 \cdot 20^2}{10^8 \cdot 0{,}1 \cdot 2}\right)^2},$$
$$\frac{I_1}{I} = 1{,}04.$$

Таким образом благодаря магнитному влиянию короткозамкнутых витков ротора ток двигателя увеличивается на 4%. Вращающий момент, однако, несмотря на увеличение тока, не станет больше, так как (фиг. 33) поток Φ_y и полный ток статора не находятся в фазе. Вращающий момент определяется лишь током:

$$I_1 \cos \alpha = I.$$

Ток короткого замыкания I_t создает джаулевы потери $I_t^2 \cdot \rho \cdot 2p$, или

$$\frac{e_t^2}{\rho} \cdot 2p \text{ ватт}.$$

Потеря напряжения в короткозамкнутых витках ротора, отнесенная к номинальному току I,

$$\varepsilon_k = \frac{2p \cdot e_t^2}{I \cdot \rho} \text{ вольт}, \tag{40}$$

где ρ — полное сопротивление короткозамкнутой цепи.

В предыдущем примере

$$2p = 2,$$
$$e_t = 6{,}3 \text{ V},$$
$$I = 1{,}3 \text{ A},$$
$$\rho = 2\ \Omega,$$

и следовательно:

$$\varepsilon_k = \frac{2 \cdot 6{,}3^2}{1{,}3 \cdot 2} = 30 \text{ вольт}.$$

В величину ρ входят: сопротивление $\frac{w_2}{K}$ витков роторной обмотки, переходное сопротивление в контакте коллектор-щетки и сопротивление самих щеток. Вследствие непостоянства двух последних величин формула (40) справедлива лишь приближенно.

РЕАКТИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

По сравнению с продолжительностью изменения одного периода тока T время короткого замыкания T_k весьма мало. Например, для одного двухполюсного двигателя на 100 W, 3000 об/мин, 50 циклов — диаметр коллектора $D_k = 55$ *мм*, число пластин $K = 54$ и коллекторное деление:

$$t_k = \frac{55 \cdot \pi}{54} = 3{,}2 \text{ мм}.$$

Обмотка выполнена таким образом, что на одну впадину приходится три пластины. Ширина щетки в тангенциальном направлении $b_B = 3$ *мм*. Ширина зоны короткого замыкания определяется по формуле:

$$s_c = t_k\left(k_B + k_n - \frac{a}{p}\right),$$

где k_B — число пластин, перекрываемых щетками,

k_n — число пластин, приходящихся на одну впадину.

В нашем примере:

$$s_c = 0{,}32 \cdot 3 = 0{,}96 \text{ см},$$

$$v_k = \frac{5{,}5 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 860 \text{ см/сек},$$

$$T_k = \frac{s_c}{v_k} = \frac{0{,}96}{860} = 0{,}0011 \text{ сек.},$$

тогда как

$$T = \frac{1}{50} = 0{,}2 \text{ сек.}$$

Поэтому процесс коммутации переменного тока может рассматриваться точно так же, как и процесс коммутации постоянного тока, и реактивное напряжение может определяться таким же путем, как и для машин постоянного тока.

По формуле Пихельмайера реактивное напряжение:

$$e_R = \zeta \cdot l_e \cdot \frac{w_2}{K} \cdot AS \cdot v \cdot 10^{-6} \text{ вольт}, \tag{41}$$

где v — окружная скорость ротора в *м/сек*,

$$\zeta = C_k \cdot \lambda_N + 2{,}5 \cdot \frac{\tau_p}{\delta_x} + \left(\frac{C_k}{2}\lambda_s + 2\lambda_q\right)\frac{l_s}{l_e}, \tag{42}$$

$$C_k = \frac{4k_n}{k_B + k_n - \frac{a}{p}},$$

$$\lambda_N = \frac{4\pi}{10}\left[0{,}42 \cdot \frac{h_n}{b_n} + 0{,}23\right] + 0{,}4 \cdot 2{,}3 \lg\left(1 + \pi\frac{z_1}{b_n}\right),$$

$$\delta_x \cong 0{,}7\tau_p (1 - a_l), \text{ так что } 2{,}5\frac{t_p}{\delta_x} \cong 10,$$

$$\lambda_s \cong 0{,}2 \div 0{,}3, \quad \lambda_q \cong 1{,}5 \div 2.$$

Для рассматриваемых малых машин

$$\frac{h_n}{b_n} \cong 2{,}5 \div 3 \quad \text{и} \quad \frac{z_1}{b_n} \cong 1{,}5,$$

$$\lambda_N \cong \frac{4\pi}{10}\left[0{,}42 \cdot 2{,}75 + 0{,}23\right] + 0{,}4 \cdot 2{,}3 \lg(1 + \pi \cdot 1{,}5) =$$

$$= 1{,}75 + 0{,}3 \cong 2,$$

$$C_k = 4 \quad \text{для} \quad k_B = 1 \quad \text{и} \quad \frac{a}{p} = 1,$$

$$\zeta \cong 4 \cdot 2 + 10 + (2 \cdot 0{,}25 + 3{,}5)\, 1{,}5 = 18 + 6 = 24.$$

Значение $\zeta = 20 \div 24$ для наших небольших машин является не слишком малым, так что реактивное напряжение при этих данных получается скорее высоким, чем низким. Величина e_k не должна превосходить 3 V.

Диаметр коллектора определяется по числу коллекторных пластин и по наименьшему допустимому коллекторному делению. Этот диаметр должен быть несколько меньше, чем диаметр ротора.

Осевая длина пластин определяется по допускаемой плотности тока Δ_B под щетками. В среднем можно полагать

$$\Delta_B = 5 \div 7 \text{ A}/\text{см}^2.$$

РАСЧЕТ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИНЫ КАК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При питании двигателя постоянным током его коэфициент полезного действия больше, чем при переменном токе. Так как, кроме того, при постоянном токе отпадает коэфициент мощности, то в этом случае потребление мощности будет меньше. При коэфициенте полезного действия η_{gl}

$$I_{gl} = \frac{P}{\eta_{gl} \cdot E_k}.$$

Для того чтобы определить величину потока Φ_y, нужно сперва задаться приближенно сопротивлением статорной обмотки. Полное падение напряжения

$$\varepsilon = I_{gl}(R_1 + R_2) + \varepsilon_B,$$

где R_1 — сопротивление статорной обмотки,

R_2 — сопротивление роторной обмотки,

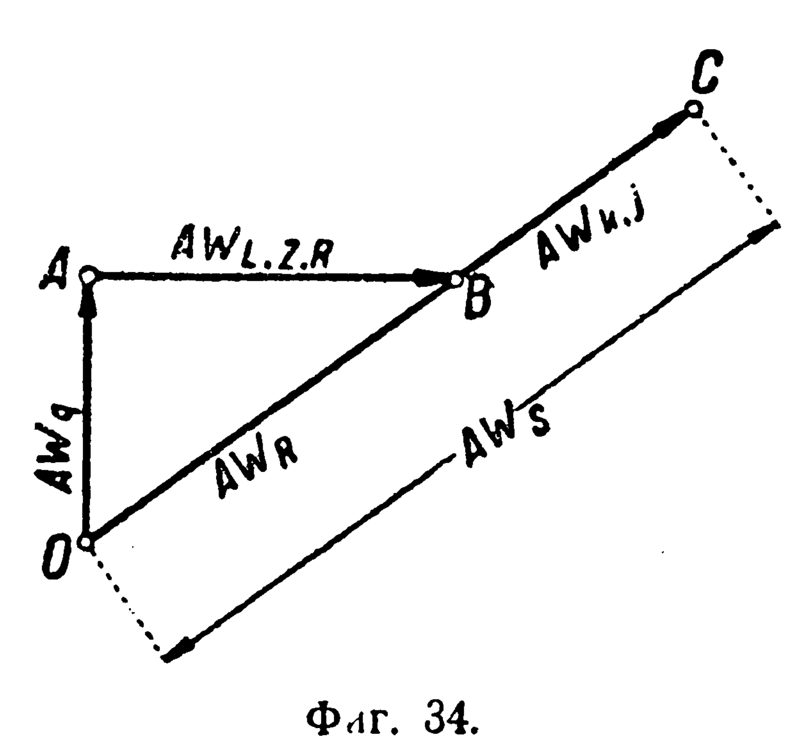
ε_B — падение напряжения под щетками.

Число оборотов и номинальная мощность должны быть обычно одинаковы как при постоянном, так и при переменном токе. Тогда магнитный поток при питании постоянным током определяется из уравнения:

$$E_r = 2w_2 \cdot \Phi_y \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{2} \cdot 10^{-8}.$$

$$\Phi_y = \frac{3000 \cdot E_r}{w_2 \cdot n \cdot \frac{p}{a}} \cdot 10^6. \qquad (43)$$

Далее по характеристике намагничивания определяем число ампервитков холостого хода, необходимое для создания потока Φ_y. Сюда надо прибавить еще некоторое количество ампервитков для компенсации реакции якоря. Поперечные ампервитки на один полюс:



Фиг. 34.

$$AW_q = \frac{w_2 \cdot I_{gl} \cdot a_l}{2p \cdot 2a}. \qquad (44)$$

Эти ампервитки прибавляются к ампервиткам для воздушного промежутка, зубцов и тела ротора, и затем сюда присоединяются еще ампервитки для полюса и ярма. На фиг. 34 показана диаграмма этого сложения.

Для того чтобы избежать каждый раз вычерчивания диаграммы и геометрического сложения, можно положить

$$x = \frac{AW_{L,Z,R}}{AW_q}, \qquad (45)$$

$$AW_R = AW_{L,Z,R} + y \cdot AW_q = (x+y)AW_q,$$

где $AW_{L,Z,R}$ — ампервитки для воздушного промежутка, зубцов и тела ротора

Из треугольника OAB следует, что

$$AW_R = \sqrt{AW_q^2 + AW_{L,Z,R}^2} = AW_q\sqrt{1+x^2}.$$

Из обоих выражений для AW_R находим:

$$x + y = \sqrt{1 + x^2},$$

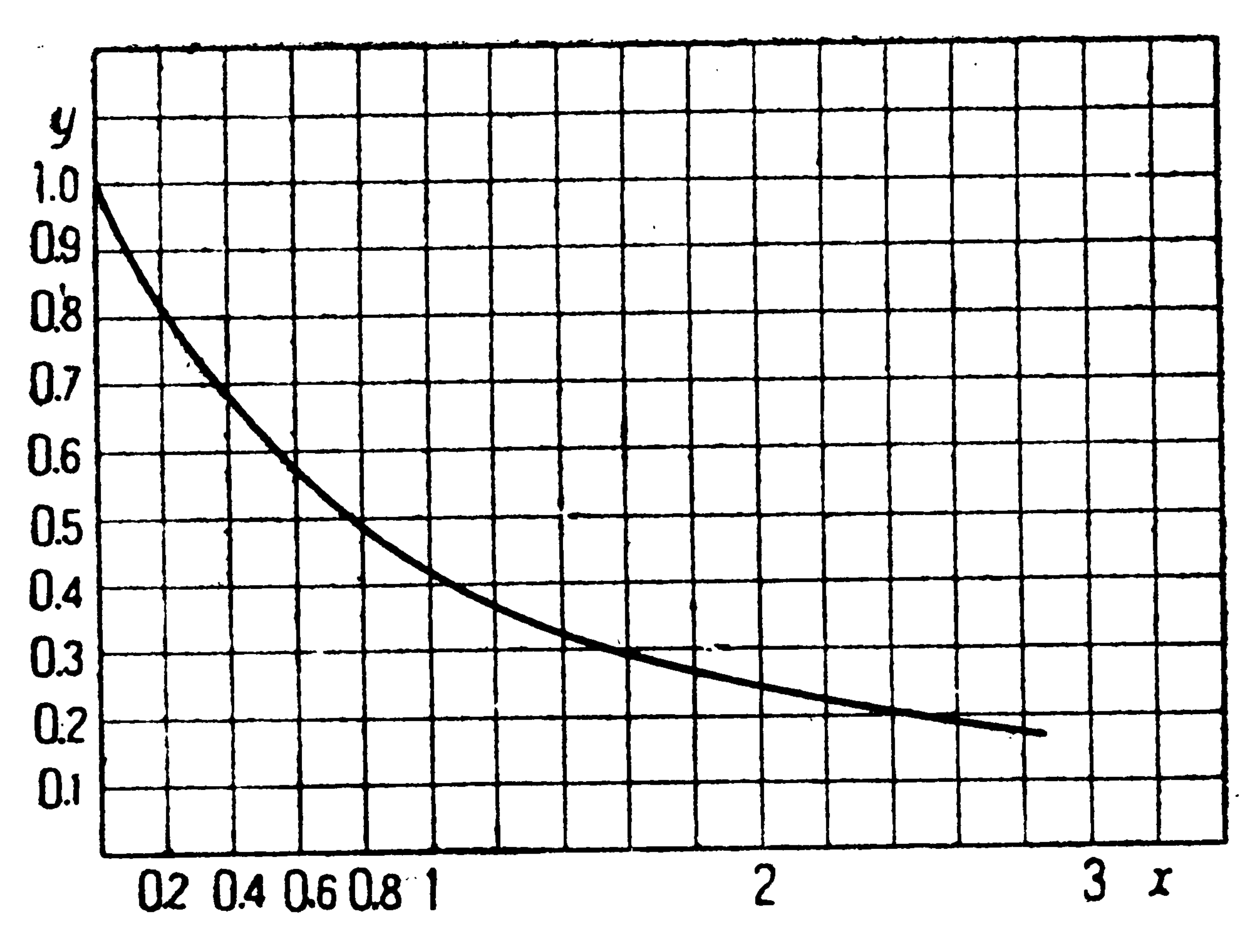
$$y = \sqrt{1 + x^2} - x. \qquad (46)$$

На фиг. 35 показана зависимость y от x. По данному значению x из этой диаграммы определяется величина y, а затем находим:

$$AW_R = AW_{L, Z, R} + y \cdot AW_q. \qquad (47)$$

Найденное таким путем число ампервитков соответствует одному полюсу статора при номинальной нагрузке. Поперечное сечение дополнительной обмотки возбуждения постоянного тока определяется по плотности тока, которую можно принимать в среднем:

$$\Delta_1 = 2{,}5 \div 3 \text{ А}/\text{мм}^2.$$



Фиг. 35.

После этого необходимо проверить, сохранило ли прежнее значение падение напряжения для статорной обмотки:

$$\varepsilon_1 = I_{gl} \cdot (R_{w} + R_{1gl}),$$

где R_{1w} — сопротивление статорной обмотки при работе на переменном токе, R_{1gl} — сопротивление дополнительной статорной обмотки постоянного тока.

ЧИСЛЕННЫЕ ПРИМЕРЫ

Расчет двигателя с последовательным возбуждением переменного тока мощностью $P = 165$ W, при $E_k = 145$V, $f_1 = 50$ циклов, $2p = 2$ и $n = 4500$ об/мин.

Выбираем $u = 0{,}16$ и из фиг. 14 получаем $\varphi = 0{,}75$. При коэфициенте полезного действия $\eta = 60\%$ сила тока:

$$I = \frac{P}{\eta \cdot \cos\varphi \cdot E_k} = \frac{165}{0{,}6 \cdot 0{,}75 \cdot 145} = 2{,}53 \text{ А}.$$

Принимая

$$\delta'' = 0{,}12\ см, \quad \varepsilon_p = 35\%, \quad AS = 82,$$

получим на основании формулы (30а):

$$C = 0{,}014\left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right) 2p^3 \cdot \frac{u}{\delta''} AS^2 \cdot 10^{-8} =$$

$$= 0{,}014 \cdot 1{,}35 \cdot 8 \cdot \frac{0{,}16}{0{,}12} \cdot 82^2 \cdot 10^{-8} = 13{,}6 \cdot 10^{-6}.$$

Тогда согласно уравнению (32):

$$\tau_p{}^3 l = \frac{P}{\eta \cdot C \cdot n} = \frac{165 \cdot 10^6}{0{,}6 \cdot 13{,}6 \cdot 4500} = 4500.$$

Для $D = 6\ см$

$$\tau_p = \frac{\pi}{2} \cdot 6 = 9{,}4\ см,$$

$$l = \frac{4500}{9{,}4^3} = 5{,}4\ см.$$

Из уравнения

$$D \cdot \pi \cdot AS = 2w_2 \cdot \frac{I}{2a}$$

следует

$$w_2 = \frac{D \cdot \pi \cdot AS \cdot a}{I} = \frac{6 \cdot \pi \cdot 82}{2{,}53} = 612.$$

При числе впадин $z_n = 16$ в каждой впадиче будет лежать:

$$s_n = \frac{2w_2}{Z_n} = \frac{2 \cdot 612}{16} \cong 78 \text{ проводников},$$

$$78 = 2 \cdot 3 \cdot 13.$$

Число коллекторных пластин $k = 16 \cdot 3 = 48$; каждая секция ротора содержит $\frac{w_2}{K} = 13$ витков.

Итак:

$$w_2 = 48 \cdot 13 = 624,$$

$$AS = \frac{w_2 \cdot I}{D \cdot \pi} = \frac{624 \cdot 2{,}53}{6 \cdot \pi} = 84.$$

Вследствие увеличения AS осевая длина может быть уменьшена с 5,4 *см* до 5,2 *см*:

$$l = 5{,}2\ см.$$

Число витков на полюс статора:

$$w_1 = \frac{w_2}{a} \cdot u = 624 \cdot 0,16 = 100,$$

$$B_{l\,\max} = \frac{4\pi}{10} \cdot w_1 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\delta''} = \frac{4\pi}{10} \cdot 100 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 2,53}{0,12} = 3750.$$

Полюсная дуга:

$$b_l = a_i \cdot \tau_p = \frac{2}{3} \cdot 9,4 = 6,3 \text{ см},$$

$$Q_l = b_l \cdot l = 6,3 \cdot 5,2 = 33 \text{ см}^2,$$

$$\Phi_v = B_{l\,\max} Q_l = 3750 \cdot 33 = 0,123 \cdot 10^6.$$

Высота впадин:

$$h_n = 0,2 \cdot D = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ см}.$$

Средний зубцовый шаг:

$$t_n = \frac{(D - h_n)\pi}{z_n} = \frac{48 \cdot \pi}{16} = 3 \cdot \pi = 9,42 \text{ мм}.$$

Ширина впадины:

$$b_n = 0,65 \cdot t_n = 0,65 \cdot 9,42 = 6,12 \text{ мм}.$$

Толщина зубца:

$$9,42 - 6,12 = 3,3 \text{ мм}.$$

Перемычку впадины у воздушного промежутка примем в 1 *мм*. Тогда площадь впадины:

$$F_n (h_n - 1) b_n \cdot 0,95 = 11 \cdot 6,12 \cdot 0,95 = 64 \text{ мм}^2,$$

где коэфициент 0,95 учитывает закругление углов.

Площадь впадины, используемая как обмоточное пространство:

$$WR = 0,6. \quad F_n = 0,6 \cdot 64 = 38,4 \text{ мм},$$

г

де 0 ,6 — коэфициент заполнени я впадины.

Из уравнения

$$WR = (d_2')^2 \cdot S_n$$

определяем диаметр изолированного проводника:

$$d_2' = \frac{\sqrt{38,4}}{78} = 0,7 \text{ мм}.$$

При двойной хлопчатобумажной изоляции диаметр голого проводника:

$$d_2 = 0{,}55\ мм,$$

$$q_2 = d_2^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0{,}238\ мм^2,$$

$$\Delta_2 = \frac{I}{2a \cdot q_2} = \frac{2{,}53}{2 \cdot 0{,}238} = 5{,}3\ \mathrm{A}/мм^2.$$

Средняя длина одного витка ротора:

$$m_2 = 2\,(l + 1{,}3\,D) = 2\,(5{,}2 + 1{,}3 \cdot 6) = 26\ см.$$

Тогда сопротивление ротора:

$$R_2 = \frac{w_2 \cdot m_2}{(2a)^2 \cdot k \cdot q_2} = \frac{624 \cdot 0{,}26}{4 \cdot 57 \cdot 0{,}238} = 3\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

а в нагретом состоянии:

$$R_{2\ нагр} = 3{,}6\ \Omega.$$

Для обмотки статора примем плотность тока:

$$\Delta_1 = 2{,}5\ \mathrm{A}/мм^2;$$

тогда

$$q_1 = \frac{2{,}53}{2{,}5} = 1\ мм^2,$$

$$d_1/d_1' = 1{,}15/1{,}25\ мм$$

(ординарная изоляция хлопчатобумажной пряжей),

$$q_1 = 1{,}04\ мм^2.$$

Средняя длина витка определяется по чертежу, показанному на фиг. 36, и составляет:

$$m_1 = 2\,(7{,}5 + 7{,}2) = 29{,}4\ см.$$

Сопротивление статорной обмотки в холодном состоянии:

$$R_{1\ хол} = \frac{2p \cdot w_1 \cdot m_1}{q_1 k} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 0{,}294}{1{,}04 \cdot 57} = 1\ \Omega,$$

а в нагретом состоянии:

$$R_{1\ нагр} = 1{,}2\ \Omega,$$

$$R_1 + R_2 = 4{,}8\ \Omega,$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 2{,}53 \cdot 4{,}8 = 12\ \mathrm{V}.$$

Трансформаторное напряжение

$$e_t = 4{,}44 \cdot f_1 \cdot \frac{w_2}{K} \cdot \Phi_y \cdot 10^{-8} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 13 \cdot 0{,}123 \cdot 10^{-2} = 3{,}55\ \mathrm{V}.$$

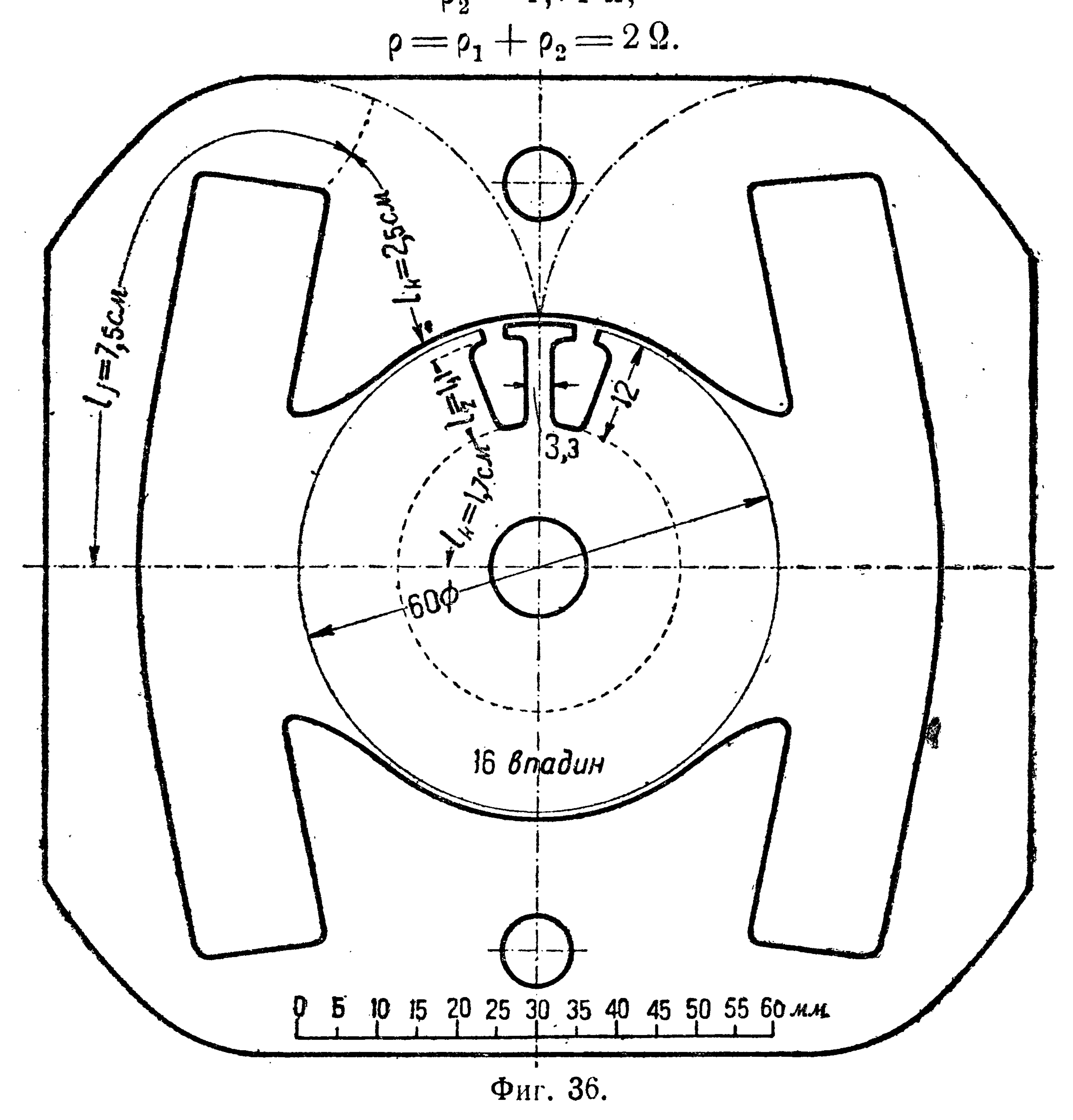
Сопротивление одной секции ротора:

$$\rho_1 = \frac{13 \cdot 0{,}26}{50 \cdot 0{,}238} = 0{,}29\ \Omega.$$

Переходное сопротивление и сопротивление щеток примем равными:

$$\rho_2 = 1{,}71\ \Omega,$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 = 2\ \Omega.$$



Фиг. 36.

Тогда согласно уравнению (40):

$$\varepsilon_k = \frac{2p \cdot e_t^2}{l \cdot \rho} = \frac{2 \cdot 3{,}55^2}{2{,}53 \cdot 2} = 5\ \text{V}.$$

Падение напряжения под щетками $\varepsilon_B = 2$ V.

Приблизительное определение потерь в железе. Вес ярма

$$G_{ej} = 1{,}2 \cdot 0{,}9 \cdot 5{,}2 \cdot 7{,}4 \cdot 4 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 1{,}3\ \text{кг}.$$

Вес сердечников

$$G_{ek} = 2{,}6 \cdot 0{,}9 \cdot 5{,}2 \cdot 2{,}2 \cdot 4 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 0{,}84\ \text{кг}.$$

Вес зубцов

$$G_{ez} = 16 \cdot 0,33 \cdot 1,2 \cdot 0,9 \cdot 5,2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 0,23 \text{ кг.}$$

Вес тела ротора

$$G_{eR} = 1,2 \cdot 0,9 \cdot 5,2 \cdot 2,4 \cdot \pi \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 0,33 \text{ кг.}$$

Индукции в отдельных частях магнитной цепи приведены в следующей таблице:

Части магнитной цепи	Q $см^2$	l см	$\Phi = 0,123 \cdot 10^6$			$\Phi = 0,1 \cdot 10^6$			$\Phi = 0,15 \cdot 10^6$		
			B	aw	AW	B	aw	AW	B	aw	AW
Воздух .	33	0,0	3 750	—	270	3 050	—	220	4 560	—	330
Зубцы .	8,25	1,1	14 9 0	15	16,5	12 100	5,5	6	18 20	130	143
Тело ротора . .	11,2	1,7	11 000	4	7	9 000	2,5	4	13 400	9,5	16
Сердечник	12,2	2,5	10 600	4,5	8,5	8 600	2,3	5	12 90	7,5	19
Ярмо . .	11,2	7 5	11 50	4,7	35	9 350	2,7	20	14 000	12,5	94

$$\sum = 337, \quad \sum = 255, \quad \sum = 602.$$

Согласно уравнению (26), получаем:

$$W_{ej} = 7 \cdot 1,15^2 \cdot 1,3 \quad = 12 \text{ W},$$
$$W_{ek} = 7 \cdot 1,06^2 \cdot 0,84 = 6,6 \text{ „}$$
$$W_{ez} = 7 \cdot 1,49^2 \cdot 0,23 = 3,6 \text{ „}$$
$$W_{eR} = 7 \cdot 1,1^2 \cdot 0,33 \quad = 2,8 \text{ „}$$
$$\sum = 25 \text{ W}.$$

Удвоив потери в роторе, получим полную потерю на гистерезис и вихревые токи

$$W_e = 30 \text{ W}.$$

Соответствующее сопротивление:

$$R_e = \frac{W_e}{I^2} = \frac{30}{2,53^2} = 4,7 \ \Omega$$

и потеря напряжения:

$$\varepsilon_e = 4,7 \cdot 2,53 = 11,8 \text{ V}.$$

Таким образом полная потеря напряжения, находящаяся в фазе с током, составляет

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_k + \varepsilon_b + \varepsilon_e = 12 + 5 + 2 + 11,8 = 31 \text{ V}.$$

Э. д. с. вращения:

$$E_r + \sqrt{2} \cdot W_2 \cdot f_2 \cdot \Phi_y \cdot 10^{-8} + \sqrt{2} \cdot 624 \cdot 75 \cdot 0,123 \cdot 10^{-2} = 81,5 \text{ V}.$$

Таким образом активная составляющая напряжения:

$$E_w = 81,5 + 31 = 112,5 \text{ V}.$$

Далее

$$E_{s_1} = 4{,}44 \cdot f_1 \cdot 2p \cdot w_1 \cdot \sigma \cdot \Phi_y \cdot 10^{-8} =$$
$$= 4{,}44 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}123 \cdot 10^{-2} = 57{,}5 \text{ V},$$

$$E_q = 0{,}085 \cdot f_1 \frac{\tau_v l}{\delta'} \cdot I \cdot w_2^2 \cdot 10^{-8} =$$
$$= 0{,}085 \cdot 50 \frac{9{,}4 \cdot 5{,}2}{0{,}09} \cdot 2{,}53 \cdot 624^2 \cdot 10^{-8} = 22{,}5 \text{ V},$$

$$E_{ss} = 3 \cdot f_1 \cdot l \cdot I \cdot w_2^2 \cdot 10^{-8} =$$
$$= 3 \cdot 50 \cdot 5{,}2 \cdot 2{,}53 \cdot 624^2 \cdot 10^{-8} = 7{,}5 \text{ V}.$$

Таким образом реактивная составляющая напряжения:

$$E_{bl} = 57{,}5 + 22{,}5 + 7{,}5 = 87{,}5 \text{ V}.$$

Полное напряжение:

$$E_k = \sqrt{E_w^2 + E_{bl}^2} = \sqrt{112{,}5^2 + 87{,}5^2} = 143 \text{ V}.$$

Коэфициент мощности:

$$\cos\varphi = \frac{112{,}5}{143} = 0{,}785.$$

В уравнении для E_{ss} поставлен коэфициент 3 вместо 3,5, так как отношение $\frac{h_n}{b_n} = \frac{11}{6{,}12} = 1{,}8$ значительно ниже принятого при выводе формулы значения 3.

Реактивное напряжение.

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0{,}06 \cdot \pi \cdot 4500}{60} = 1{,}41 \text{ м/сек},$$

$$e_k = \zeta \cdot l_e \cdot \frac{w_2}{K} \cdot AS \cdot v \cdot 10^{-8} = 20 \cdot 4{,}7 \cdot 13 \cdot 84 \cdot 14{,}1 \cdot 10^{-8} = 1{,}45 \text{ V}.$$

Так как реактивное и трансформаторное напряжения невелики, то тем самым обеспечивается хорошая коммутация, что является необходимым при длительной работе двигателя.

Коллектор и щетки.

Диаметр коллектора можно взять равным $D_k = 55$ *мм*, и тогда коллекторное деление:

$$t_k = \frac{D_k \cdot \pi}{K} = \frac{55 \cdot \pi}{48} = 3{,}6 \text{ мм}.$$

Наименьшее число пластин, согласно уравнению (36*a*):

$$K_{\min} = a \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right) \cdot \frac{E_r}{2} = \frac{50}{75} \cdot \frac{81{,}5}{2} = 27.$$

Ширину щетки в тангенциальном направлении возьмем $b_B = 5$ *мм* в аксиальном $l_B = 10$ *мм* Тогда плотность тока под щеткой при наличии одной щетки на болт:

$$\Delta_B = \frac{2,53}{0,5} \cong 5 \text{ A}/\text{см}^2.$$

Полезную аксиальную длину коллекторной пластины возьмем равной 15 *мм.*

Магнитная цепь.

В приведенной выше таблице указаны числа ампервитков для различных значений магнитного потока при принятой величине воздушного промежутка $\delta = 0,8$ *мм.*

Кажущееся увеличение воздушного промежутка вследствие наличия на роторе впадин определяется по формуле:

$$\delta' = k_l \cdot \delta,$$

где

$$k_l = \frac{1}{1 - \frac{\alpha \cdot \beta}{\alpha + 5}},$$

$$\alpha = \frac{\text{ширина впадины}}{\text{воздушный промежуток}},$$

$$\beta = \frac{\text{ширина впадины}}{\text{зубцовое деление}}.$$

При ширине впадины $b_s = 3$ *мм*

$$\alpha = \frac{3}{0,8} = 3,75,$$

$$\beta = \frac{3}{11,75} = 0,255,$$

$$k_l = \frac{1}{1 - \frac{3,75 \cdot 0,255}{8,75}} = 1,12,$$

$$\delta' = 0,8 \cdot 1,12 = 0,9 \text{ мм},$$

$$AW_l = 0,8 \cdot \delta' B_e = 0,8 \cdot 0,09 \cdot 3750 = 270$$

при

$$\Phi_y = 0,123 \cdot 10^6.$$

Потоку $\Phi_y = 0,123 \cdot 10^6$ соответствует при холостом ходе $AW_{s_0} = 336$, а при нагрузке около $AW_s \cong 350$ ампервитков на полюс.

При нормальном токе $I=2,53$ А число ампервитков на полюс получается равным

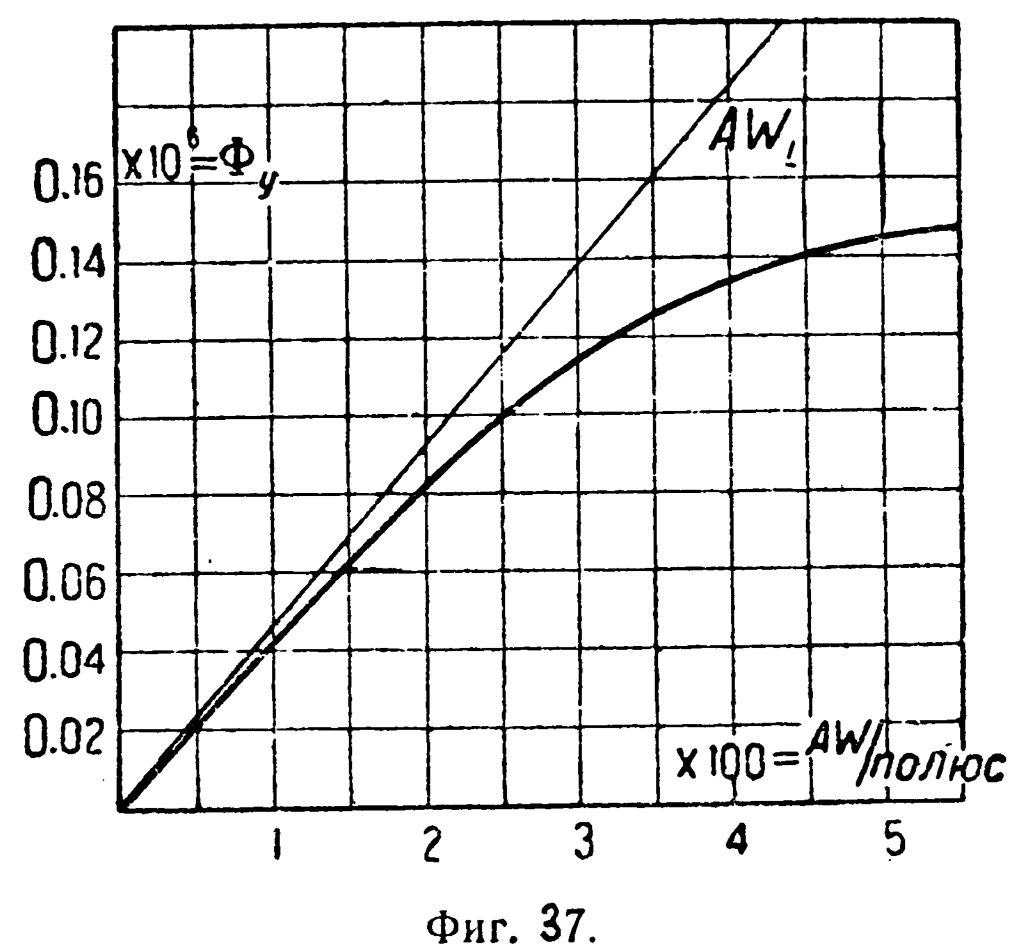
$$AW_s=\sqrt{2}\cdot IW_1=\sqrt{2}\cdot 2,53\cdot 100=358.$$

Таким образом воздушный промежуток $\delta=0,8$ *мм* выбран нами правильно. Величина

$$\delta''=\frac{350}{270}\cdot 0,09=0,117\ см.$$

Нами было принято $\delta''=0\ 12$ *см.*

Кривая намагничивания показана на фиг. 37. Значения ампервитков на сантиметр взяты из кривых приведенной в конце книги таблицы.



Фиг. 37.

Коэфициент полезного действия.

Потеря в обмотке статора и ротора —

$$(\varepsilon_1+\varepsilon_2)\cdot I = 12\cdot 2,53=30\ \text{W}.$$

Потеря при коммутации $\varepsilon_k\cdot I=5\cdot 2,53=12\,6$ W.

Переходная потеря на коллекторе — $\varepsilon_B\cdot I=2\cdot 2,53=5$ W.

Потеря в железе — $\varepsilon_e\cdot I=11,8\cdot 2,53=30$ W.

Общая потеря на трение (предварительно) — 30 W.

Полная потеря машины составляет таким образом:

$$W_g \cong 108\ \text{W}.$$

Потребление мощности составляет:

$$E_k\cdot I\cdot\cos\varphi=145\cdot 2,53\cdot 0,785=288\ \text{W}.$$

Отдаваемая мощность:

$$288-108=180\ \text{W}.$$

Тогда коэфициент полезного действия:

$$\eta=\frac{180}{288}=0,625\cong 62,5\%.$$

Потеря на трение в подшипниках приблизительно:

$$W_R = 0,7 \cdot d_z \cdot l_z \cdot \sqrt{v_z^3} \text{ ватт на подшипник,}$$

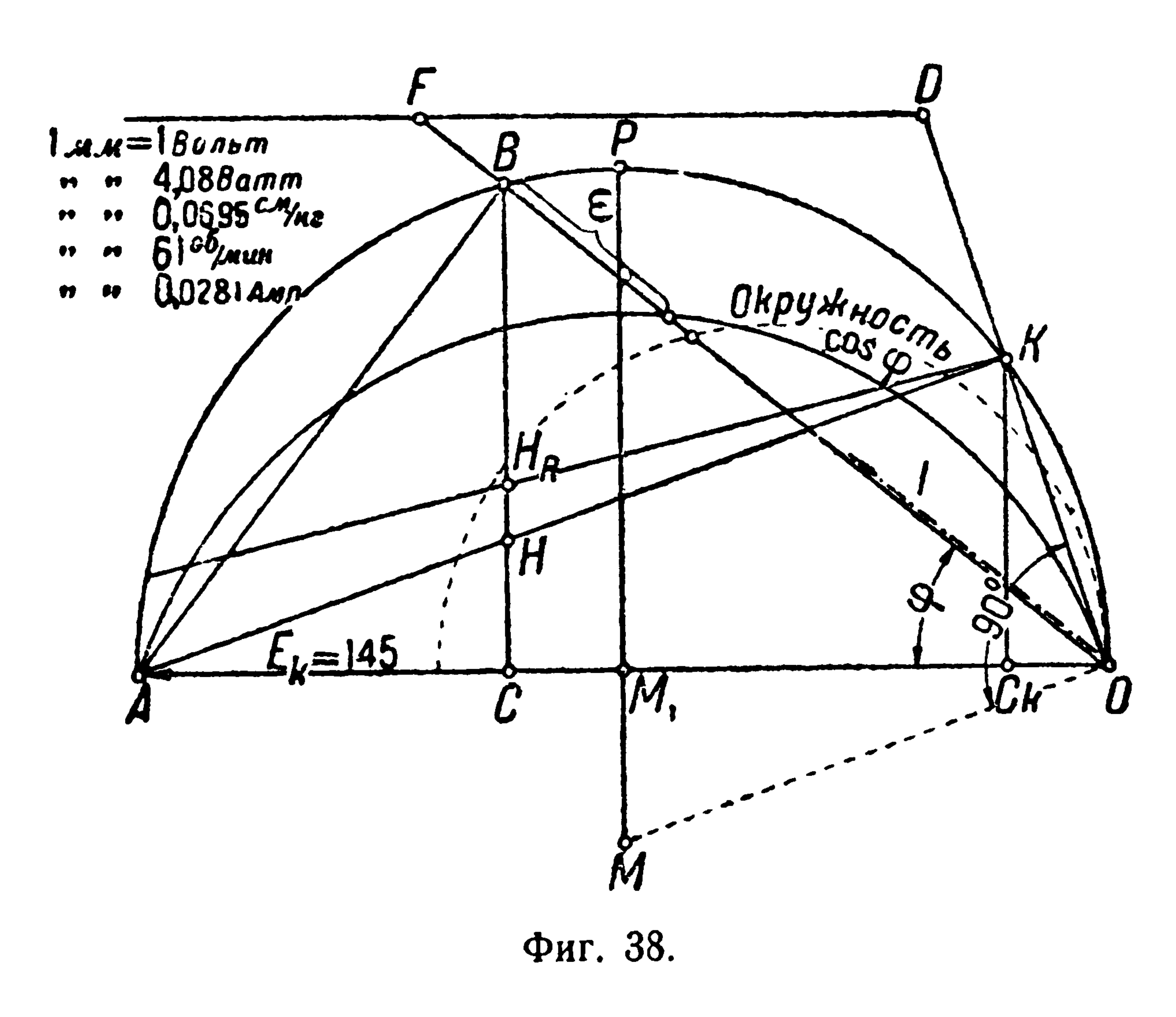
где d_z — диаметр цапфы в *см*,

l_z — длина цапфы в *см*,

v_z — окружная скорость цапфы в *м/сек*.

Так как внутренний диаметр тела ротора составляет $d_w = 12$ *мм*, то можно принять:

$$d_z = 10 \text{ мм},$$
$$l_z = 25 \text{ мм},$$
$$v_z = \frac{0,01 \cdot \pi \cdot 4500}{60} = 2,35 \text{ м/сек}.$$



Фиг. 38.

Таким образом для обоих подшипников:

$$W_R = 2 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot \sqrt{2,35^3} = 12,5 \text{ W}.$$

Принимая потерю на трение щеток и на сопротивление воздуха равной также 12,5 W, получим полную потерю на трение, равную 25 W.

Для надежности можно сохранить принятое нами выше значение 30 W.

На чертеже, приведенном на фиг. 36, место для статорной обмотки взято с таким запасом, чтобы иметь возможность поместить еще дополнительную обмотку возбуждения постоянного тока и тем самым превратить двигатель в универсальный.

На фиг. 38 показана векторная диаграмма двигателя, а на фиг. 39 — характеристичные кривые в зависимости от вращающего момента M_d.

На оригинальном чертеже отрезок $\overline{OA}$, представляющий собой напряжение на зажимах, взят равным 145 *мм*, так что

$$1 \text{ мм} = 1 \text{ V}.$$

Под углом φ проведена линия $\overline{OB}$ и опущен перпендикуляр $\overline{BC}$. Так как $\overline{BC}$ представляет собой потребляемую мощность для угла φ, то

$$\overline{BC} = 288 \text{ W} = 70{,}5 \text{ мм},$$

т. е.

$$1 \text{ мм} = 4{,}08 \text{ W}.$$

Отрезок $\overline{AB} = 90 \text{ мм} = 2{,}53 \text{ A}$,

т. е.

$$1 \text{ мм} = \frac{2{,}53}{90} = 0{,}0281 \text{ A}.$$

Вращающий момент в *кгсм*:

$$M_d = \frac{0{,}973 \cdot \text{полезная мощность}}{\left(\frac{n}{100}\right)} = \frac{0{,}973 \cdot 180}{45} = 3{,}89 \text{ кгсм}.$$

Отрезок $\overline{AC} = 56 \text{ мм} = 3{,}89 \text{ кгсм}$,

т. е.

$$1 \text{ мм} = \frac{3\ 89}{56} = 0{,}0695 \text{ кгсм}.$$

Отрезок $\overline{DF} = 74 \text{ мм} = 4500$ об/мин,

т. е.

$$1 \text{ мм} = \frac{4500}{74} = 61 \text{ об/мин}.$$

Эти масштабы написаны на фиг. 38 и с их помощью начерчены кривые на фиг. 39.

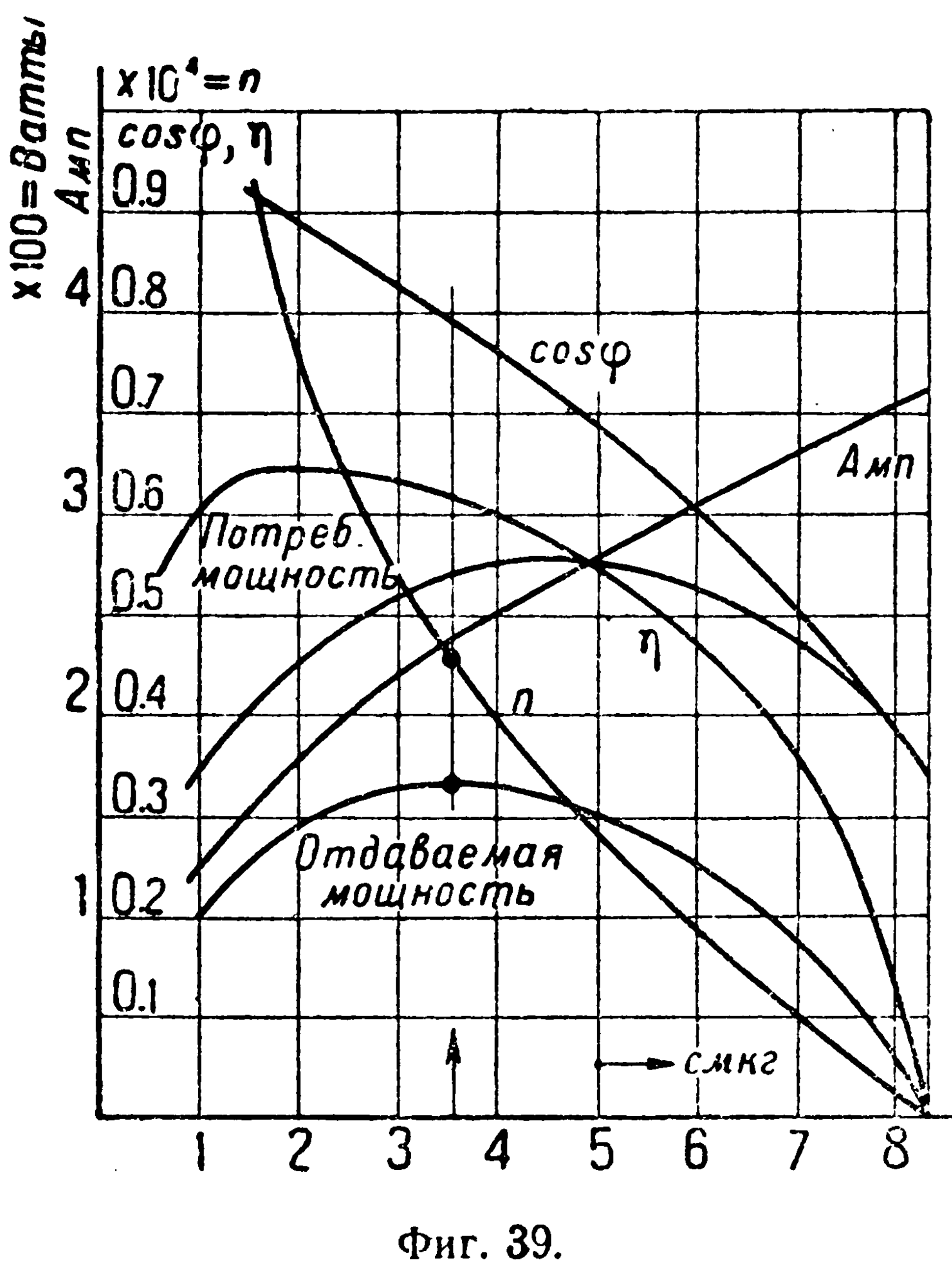
Из диаграмм следует, что $P = 180$ W представляет собой как раз максимальную мощность машины.

Так как вблизи максимума кривая мощности имеет пологий вид (почти постоянное явление для электрических машин), то незначительное изменение мощности вызывает большое изменение вращающего момента и числа оборотов.

Согласно фиг. 39, мощности $P=165$ W соответствует $n=7100$ об/мин и $M_d=2{,}4$ *кгсм*, или $n=2850$ об/мин и $M_d=5{,}4$ *кгсм*. Так как для этих двигателей отношение

$$\frac{\text{максимальная мощность}}{\text{номинальная мощность}}$$

не на много отличается от 1, то для числа оборотов приходится давать больший допуск, чем это принято для электродвигателей вообще. Вместо обычных 10% для данного типа двигателей допускается 20%. Так как в нашем примере допуск выходит за пределы указанной нормы, то двигатель придется пересчитать. Попробуем сперва увеличить магнитный поток путем увеличения числа витков w_1 от 100 до 105.



Фиг. 39.

При $\eta=0{,}62$ и $\cos\varphi_1=0{,}78$

$$I=\frac{165}{0{,}62\cdot 0{,}78\cdot 145}=2{,}35,$$

$$AW_s=\sqrt{2}\cdot 2{,}35\cdot 105=350.$$

Согласно фиг. 37, этому значению соответствует

$$\Phi_v=0{,}124\cdot 10^6$$

$$R_1=1{,}05\cdot 1{,}2=1{,}26$$

$$R_1+R_2=3{,}6+1{,}26=4{,}86\ \Omega$$

$$\varepsilon_1+\varepsilon_2=2{,}35\cdot 4{,}86=11{,}4\ \text{V}$$

$$\varepsilon_B=\qquad 2{,}0\ \text{,,}$$

$$\varepsilon_k=\qquad 5{,}4\ \text{,,}$$

$$\varepsilon_e=\frac{30}{2{,}35}=\qquad 12{,}7\ \text{,,}$$

$$\varepsilon=31{,}5\ \text{V}$$

$$E_r=\sqrt{2}\cdot 624\cdot 75\cdot 0{,}124\cdot 10^{-2}=\ 82{,}0\ \text{V}$$

$$E_w=113{,}5\ \text{V}$$

$$E_{s1} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 105 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}124 \cdot 10 = 60{,}6$$

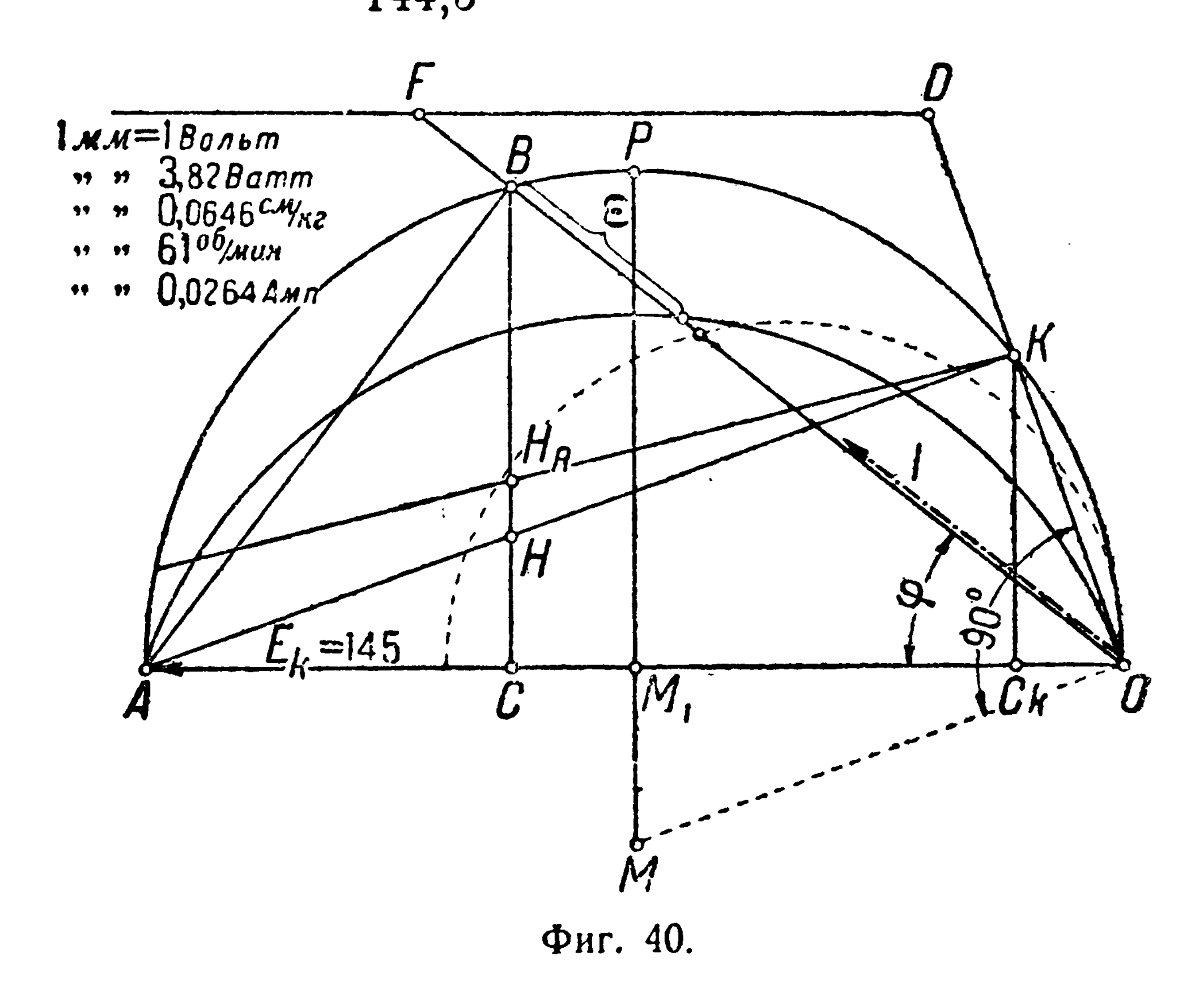
$$E_q = \frac{2{,}35}{2{,}53} \cdot 22{,}5 = 21{,}0$$

$$E_{ss} = \frac{2{,}35}{2{,}53} \cdot 7{,}5 = 7{,}0$$

$$E_{bl} = 88{,}6$$

$$E_k = \sqrt{113{,}5^2 + 88{,}6^2} = 144{,}5 \text{ V},$$

$$\cos\varphi = \frac{113{,}5}{144{,}5} = 0{,}787.$$



Фиг. 40.

Коэфициент полезного действия.

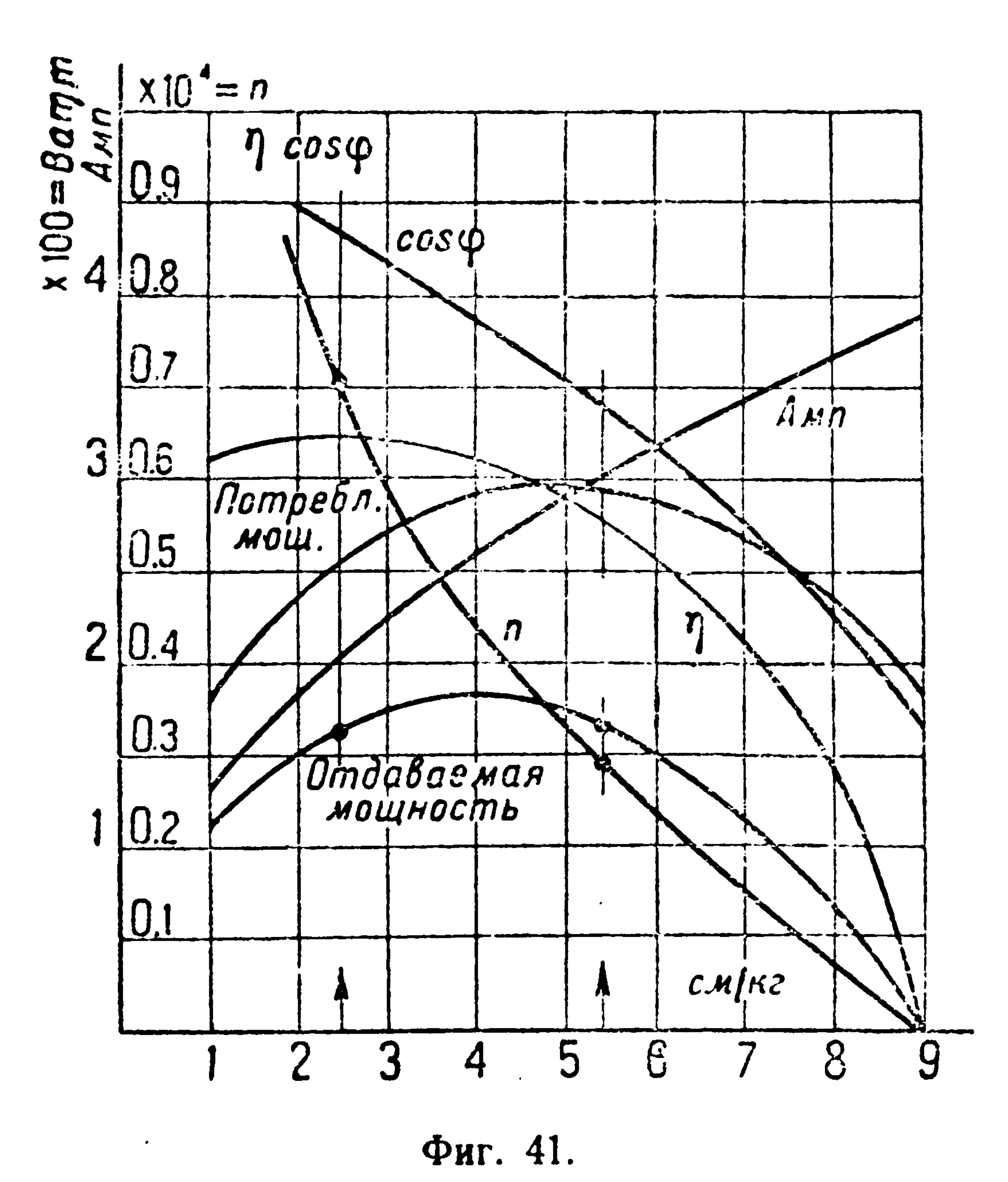
$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot I = 11{,}4 \cdot 2{,}35 = 26{,}8 \text{ W}$$
$$\varepsilon_k \cdot I = 5{,}4 \cdot 2{,}35 = 12{,}7 \text{ „}$$
$$\varepsilon_B \cdot I = 2 \cdot 2{,}35 = 4{,}7 \text{ „}$$
$$\varepsilon_e \cdot I = 12{,}7 \cdot 2{,}35 = 30{,}0 \text{ „}$$
$$\text{Трение} = 30{,}0 \text{ „}$$
$$W_g = 104 \text{ W}$$

Потребляемая мощность — $E_k \cdot I \cdot \cos\varphi = 145 \cdot 2{,}35 \cdot 0{,}787 = 268$ W.
Полезная мощность — $268 - 104 = 164$ W,

$$\eta = \frac{164}{268} \cdot 100 = 61{,}3\%.$$

Из этих новых значений получается векторная диаграмма, показанная на фиг. 40, и рабочие кривые, приведенные на фиг. 41.

Из всего изложенного следует, что число витков статора должно рассчитываться с особенной тщательностью. В нашем случае путем увеличения его всего на 5% мы достигли того, что число оборотов двигателя $n = 4500$ лежит в допускаемых пределах.



Фиг. 41.

Поверочный расчет выполненного двигателя

На фиг. 25 показаны рабочие кривые, полученные при испытании двигателя на 165 W, 145 V, 50 циклов, 4500 об/мин. Эти данные совпадают, таким образом, с данными первого примера.

Рассматриваемый двигатель имеет:

$$D = 6 \text{ см},$$

$$l = 5 \text{ см},$$

$$z_n = 18 \text{ впадин},$$

$$w_2 = 648,$$

$$w_1 = 105,$$

$$R_2 = 4{,}15\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_1 = 1{,}15\ \Omega \quad \text{"} \qquad \text{"}$$

Таким образом

$$u = \frac{105}{648} = 0{,}162.$$

Из фиг. 25 видно, что мощности

$$P = 165 \text{ W}$$

соответствует

$$M_d = 3{,}6 \text{ кгсм},$$

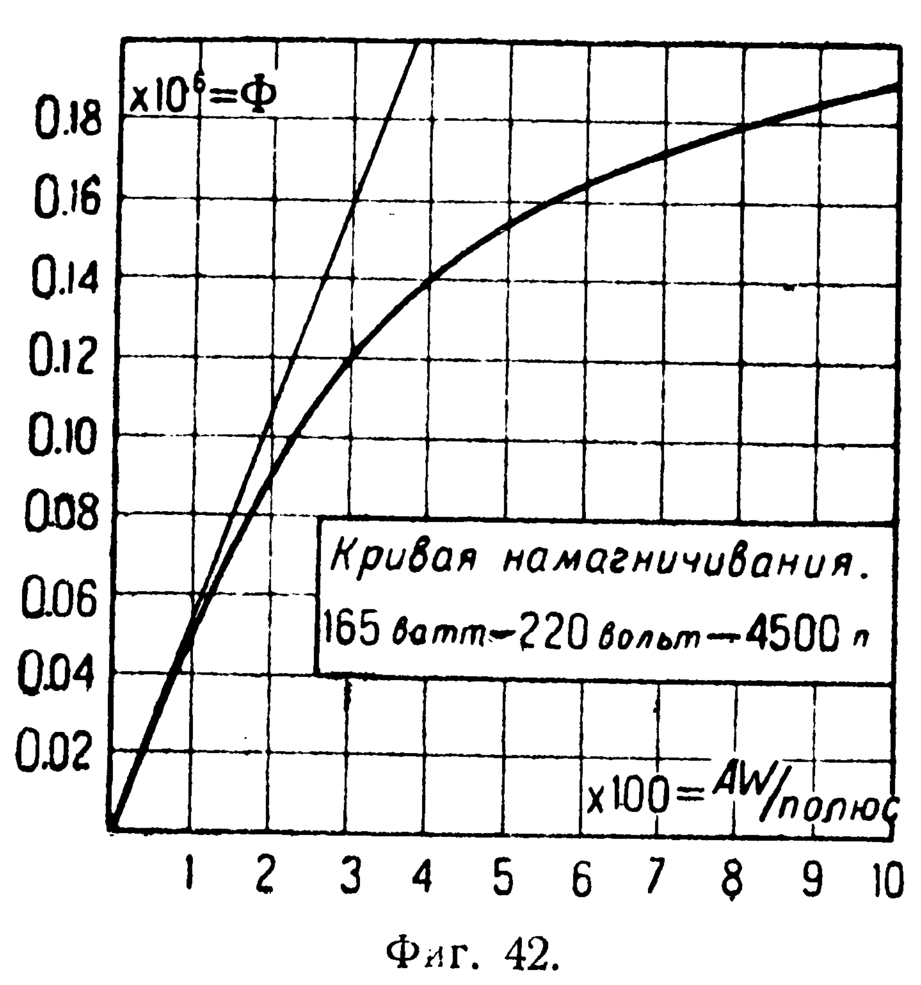
$$n = 4450 \text{ об/мин},$$

$$\cos\varphi = 0{,}8,$$

$$I = 2{,}55 \text{ A}.$$

Потребляемая мощность

$$P_a = E_k \cdot I \cdot \cos\varphi = 2{,}55 \cdot 145 \cdot 0{,}8 = 296,$$



Фиг. 42.

$$\eta = \frac{165}{296} = 0{,}56 = 56\%.$$

Число ампервитков на полюс:

$$AW_s = \sqrt{2} \cdot I \cdot w_1 = \sqrt{2} \cdot 2{,}55 \cdot 105 = 380.$$

Из кривой намагничивания (фиг. 42) находим поток:

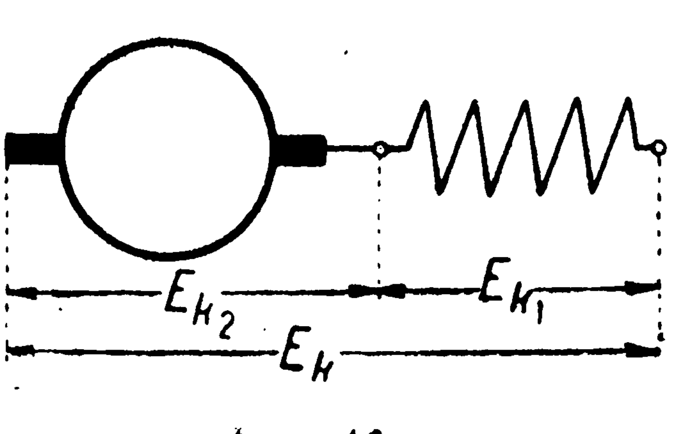
$$\Phi_y = 0{,}135 \cdot 10^6.$$

Обе составляющие напряжения E_{k1} и E_{k2}, геометрическая сумма которых равна напряжению на зажимах E_k (фиг. 43), могут быть легко измерены. На фиг. 44 показана зависимость E_{k1} и E_{k2} от силы тока. Для нормального тока:

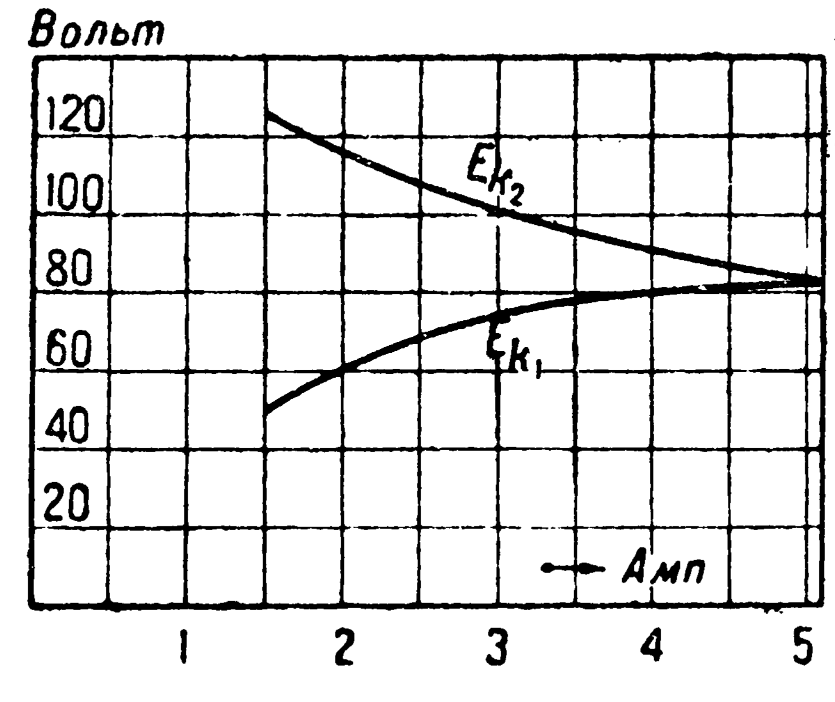
$$I = 2{,}55 \text{ A},$$
$$E_{k2} = 107 \text{ V},$$
$$E_{k1} = 68 \text{ V}.$$

На диаграмме фиг. 45 показано геометрическое сложение этих составляющих.

Так как, согласно кривым фиг. 25, $\cos\varphi = 0{,}8$, то легко



Фиг. 43.



Фиг. 44.

может быть произведено разложение E_{k1} и E_{k2} на активные и реактивные составляющие.

Реактивная составляющая E_{k1} имеет величину, равную 67 V, и представляет собой не что иное, как э. д. с. E_{s_1}.

При заданных значениях:

$$E_{s_1}=4{,}44\cdot f_1\cdot 2p\cdot w_1\cdot \sigma\cdot \Phi_y\cdot 10^{-8}=$$
$$=4{,}44\cdot 50\cdot 2\cdot 105\cdot 1{,}05\cdot 0{,}135\cdot 10^{-2}=66\ \text{V},$$

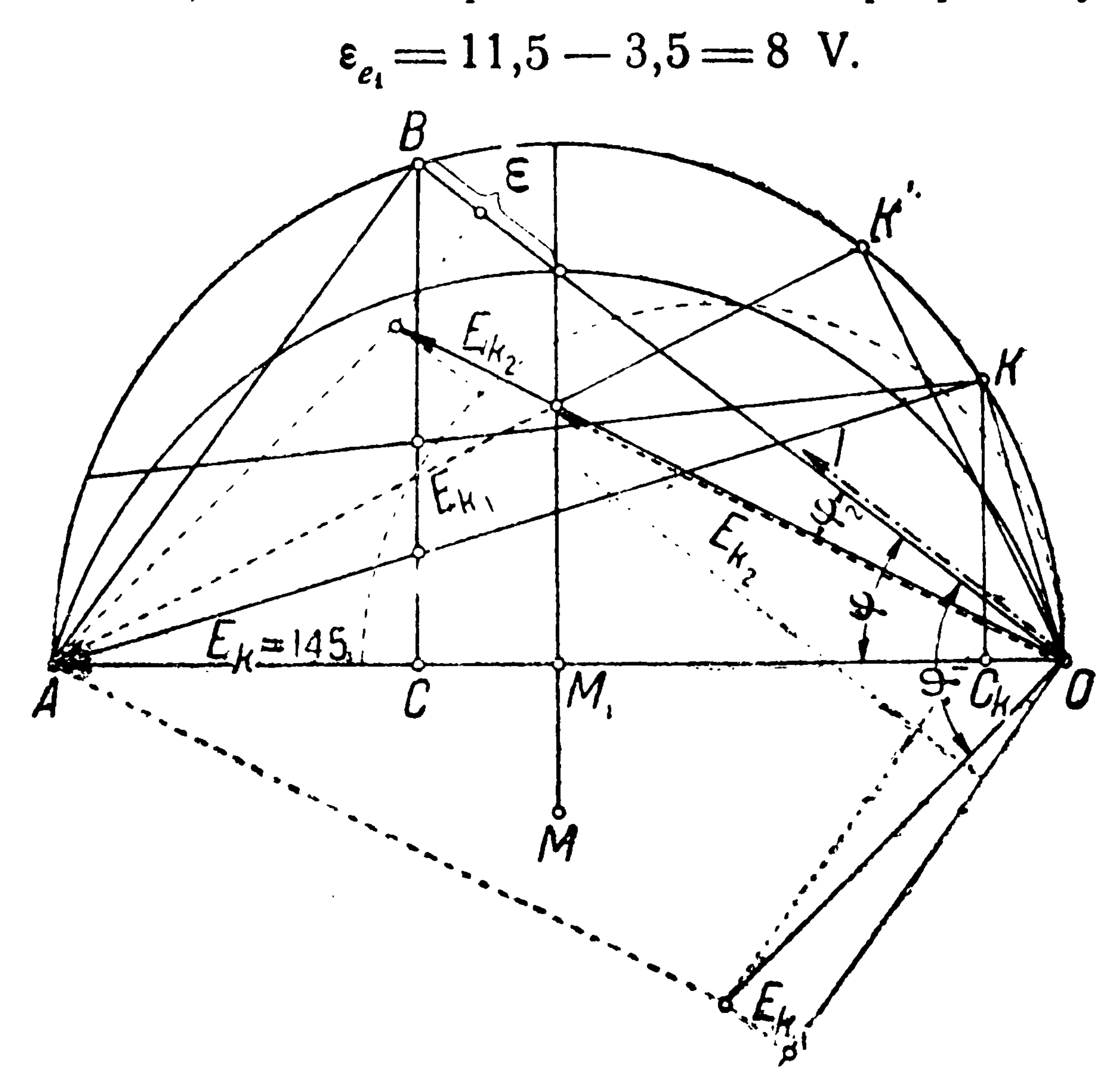
т. е. мы имеем вполне достаточное для практики совпадение.

Омическое падение напряжения в статорной обмотке

$$\varepsilon_1=I\cdot R_1=2{,}55\cdot 1{,}2\cdot 1{,}15=3{,}5\ \text{V}.$$

Так как активная составляющая E_{k1}, согласно фиг. 45, имеет величину 11,5 V, то на потери в железе статора расходуется:

$$\varepsilon_{e_1}=11{,}5-3{,}5=8\ \text{V}.$$



Фиг. 45.

Соответствующая потеря составляет $8\cdot 2{,}55=20{,}5$ W.

Реактивная составляющая E_{k2}, согласно фиг. 45, равна 20 V, а ее активная составляющая 105,5 V.

Так как

$$E_r=\sqrt{2}\cdot f_2\cdot w_2\cdot \Phi_y\cdot 10^{-8}=\sqrt{2}\cdot 74{,}2\cdot 648\cdot 0{,}135\cdot 10^{-2}=91{,}5\ \text{V},$$

то на другие потери напряжения остается $105{,}5-91{,}5=14$ V.

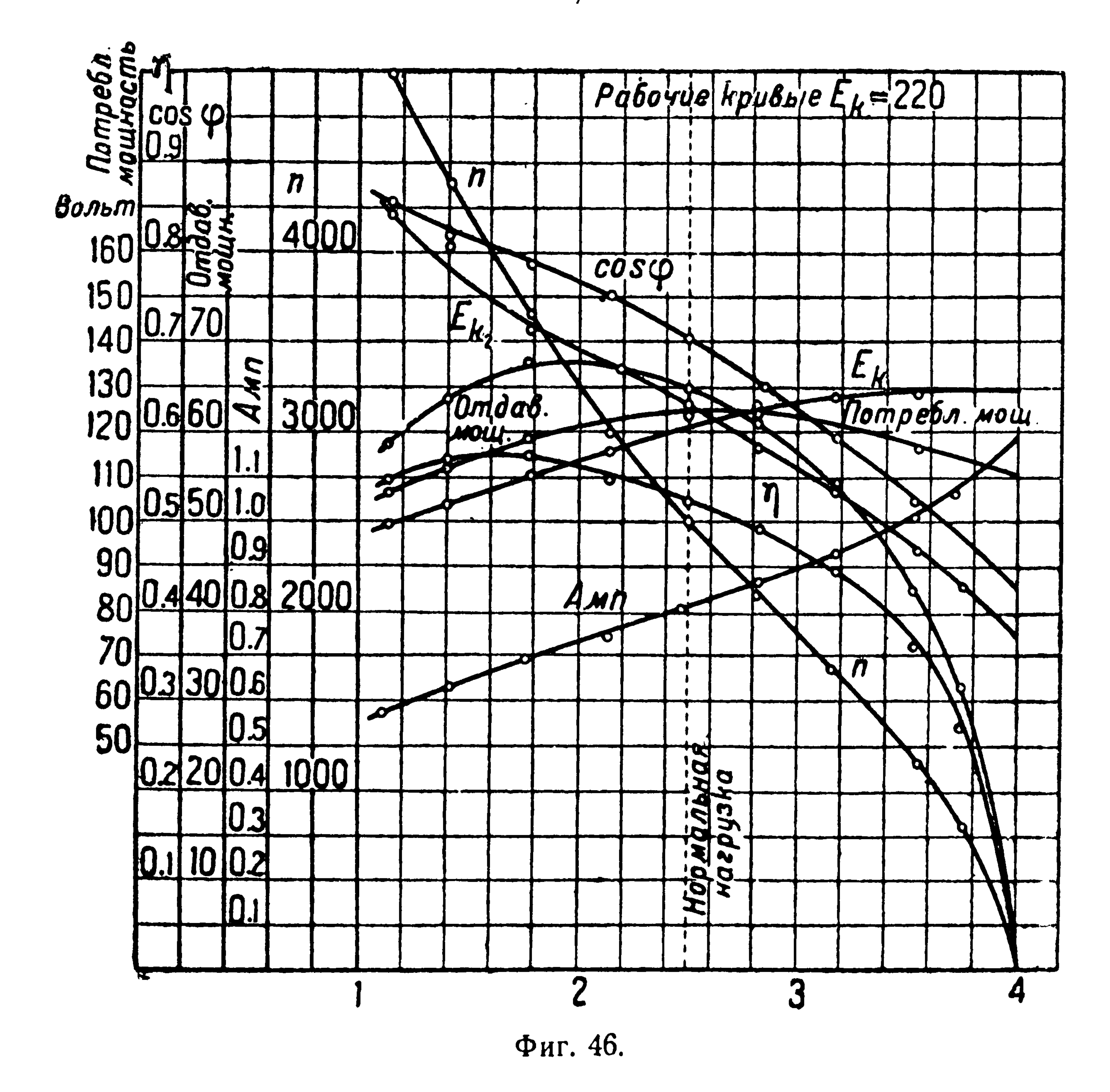
Величина $\varepsilon_2=2{,}55\cdot 1{,}2\cdot 4{,}15=12{,}5$ V.

Если потерю напряжения под щетками положить равной $\varepsilon_B=1{,}5$ V, то на остальные потери напряжения $\varepsilon_k+\varepsilon_{e2}$ уже ничего не остается.

Из этого следует, что потеря в железе ротора ничтожна и что потери напряжения в короткозамкнутых катушках также чрезвычайно малы и ими можно пренебречь.

Если дополнить векторную диаграмму данными, соответствующими нормальной мощности $P = 165$ W, то из треугольника короткого замыкания AKO находим ток при неподвижном двигателе $I_k = 4{,}1$ A и соответственный коэфициент мощности:

$$\cos\varphi_k = \frac{165}{145 \cdot 4{,}1} = 0{,}28.$$



Фиг. 46.

Потребляемая мощность при коротком замыкании составляет $KC_k = 165$ W.

Из фиг. 44 видно, что при коротком замыкании сила тока равна 5,1 A и $E_{k1} = E_{k2} = 81$ V.

Из фиг. 25

$$\cos\varphi_k = 0{,}44,$$

что соответствует потребляемой мощности

$$P_{ak} = 145 \cdot 5{,}1 \cdot 0{,}44 = 325 \text{ W}.$$

Если нанести эти напряжения на диаграмму фигуры 45, то получится треугольник короткого замыкания $AK'O$.

Фиг. 47.

Этот треугольник не может, однако, соответствовать действительности, так как E_{k1} — здесь чисто реактивное напряжение, что при наличии потерь в меди и железе невозможно.

Таким образом экспериментально полученные значения не являются безошибочными, а следовательно, не могут служить для достаточно обоснованных заключений.

Отметим еще, что вследствие обработки между статорными местами может получиться электрическое соединение, что вызовет усиленное образование вихревых токов.

Отсюда становится необходимым с большой тщательностью электрически изолировать отдельные листы, составляющие статор.

На фиг. 46 показаны полученные торможением рабочие кривые двигателя такого же типа, но на 65 W, 220 V, 50 циклов, 250 об/мин.

Здесь при неподвижном роторе $E_{k1} = 131$ V, $E_{k2} = 75$ V. Алгебраическая сумма их меньше чем 220 V, т. е. измеренные значения не вполне правильны. По всей вероятности величина E_{k2} слишком мала.

На фиг. 47 показана зависимость отдельных величин от напряжения на зажимах E_k при постоянном вращающем моменте $M_d = 3{,}75$ *кгсм*. Здесь особенно резко бросается в глаза значительное изменение числа оборотов от напряжения, чем обусловлено также изменение E_{k2} и $\cos\varphi$.

Расчет универсального двигателя на 80 W, 220 V, 50 циклов, 3000 об/мин, $2p = 2$

Для этой машины примем такую же модель, как и в первом примере. По фиг. 14 выбираем коэфициент мощности $\cos\varphi = 0{,}63$. Зададимся коэфициентом полезного действия $\eta = 55\%$, тогда сила тока при работе на переменном токе

$$I = \frac{80}{0{,}63 \cdot 0{,}55 \cdot 220} = 1{,}05 \text{ A}.$$

Из уравнения $\tau_p^3 \cdot l = \frac{P}{\eta \cdot C \cdot n}$ определяем C, так как все остальные величины нам известны.

Величина

$$C = \frac{P}{\eta \cdot n \cdot \tau_p^3 \cdot l} = \frac{80}{0{,}55 \cdot 3000 \cdot 9{,}4^3 \cdot 5{,}2} = 11{,}3 \cdot 10^{-6}.$$

При $\varepsilon_p = 45\%$, $\delta'' = 0{,}12$ *см*, $AS = 82$ из уравнения (30a) следует:

$$u = \frac{C \cdot \delta'' \cdot 10^8}{0{,}014\left(1 + \frac{\varepsilon_p}{100}\right)(2p)^3 \cdot AS^2} = \frac{11{,}3 \cdot 0{,}12 \cdot 100}{0{,}014 \cdot 1{,}45 \cdot 8 \cdot 82^2} = 0{,}125.$$

Число витков ротора:

$$w_2 = \frac{D \cdot \pi \cdot AS \cdot a}{I} = \frac{6 \cdot \pi \cdot 82}{1{,}05} = 1470.$$

Число проводников на впадину:

$$s_n = \frac{2 \cdot 1470}{16} \cong 180 = 2 \cdot 3 \cdot 30.$$

Диаметр изолированного проводника:

$$d'_2 = \sqrt{\frac{WR}{s_n}} = \sqrt{\frac{38{,}4}{180}} = 0{,}46 \text{ мм}.$$

Диаметр голого проводника при изоляции из хлопчатой бумаги:

$$d_2 = 0{,}3 \text{ мм}$$

и соответственно

$$q = 0{,}0707 \text{ мм}^2,$$

$$\Delta_2 = \frac{I}{2a \cdot q_2} = \frac{1{,}05}{2 \cdot 0{,}0707} = 7{,}4 \text{ А/мм}^2.$$

Такая плотность тока слишком велика, и поэтому линейную нагрузку AS уменьшаем до 75.

Тогда

$$w_2 = \frac{6 \cdot \pi \cdot 75}{1{,}05} = 1350,$$

$$s_n = 2 \cdot 3 \cdot 28 = 168,$$

$$w_2 = 168 \cdot \frac{16}{2} = 1344,$$

$$d_2/d_2' = 0{,}32/0{,}47 \text{ мм},$$

$$q_2 = 0{,}0804 \text{ мм}^2,$$

$$\Delta_2 = \frac{1{,}05}{2 \cdot 0{,}0804} = 6{,}5 \text{ А/мм}^2,$$

$$u = 0{,}125 \left(\frac{82}{75}\right)^2 = 0{,}15.$$

Число витков статора на один полюс:

$$w_1 = \frac{w_2}{a} \cdot u = 1344 \cdot 0{,}15 = 200.$$

Индукция:

$$B_{l\max} = \frac{4\pi}{10} \cdot 200 \frac{\sqrt{2} \cdot 1{,}05}{0{,}12} = 3400 \, [\delta'' = 0{,}11].$$

Поток:

$$\Phi_v = 3400 \cdot 33 = 0,112 \cdot 10^6.$$

Согласно фиг. 37, этому потоку соответствуют $AW_s \backsimeq 300$. На этой величине можно остановиться, так как

$$\sqrt{2} \cdot w_1 \cdot I = \sqrt{2} \cdot 200 \cdot 1,05 = 300.$$

Плотность тока в обмотке ротора примем снова

$$\Delta_1 = 2,5 \text{ A}/мм^3,$$

тогда

$$q_1 = \frac{1,05}{2,5} = 0,42 \ мм^2,$$

$$d_1/d_1' = 0,75/0,85 \ мм,$$

$$q_1 = 0,442 \ мм^2,$$

$$R_2 = \frac{w_2 \cdot m_2}{(2a)^2 \cdot k \cdot q_2} = \frac{1344 \cdot 0,26}{4 \cdot 57 \cdot 0,0804} = 19 \ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_2 = 1,2 \cdot 19 = 23 \ \Omega \text{ (в теплом состоянии)},$$

$$R_1 = \frac{2p \cdot w_1 \cdot m_1}{k \cdot p_1} = \frac{2 \cdot 200 \cdot 0,294}{57 \cdot 0,442} = 4,7 \ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_1 = 1,2 \cdot 4,7 = 5,6 \ \Omega \text{ (в теплом состоянии)},$$

$$R_1 + R_2 = 23 + 5,6 = 28,6 \ \Omega,$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 28,6 \cdot 1,05 = 30 \text{ V}.$$

Трансформаторное напряжение

$$e_t = 4,44 \cdot 50 \cdot 28 \cdot 0,112 \cdot 10^{-2} = 7 \text{ V}.$$

Сопротивление одной секции ротора

$$\rho_1 = \frac{28 \cdot 0,26}{50 \cdot 0,0804} = 1,8 \ \Omega.$$

Сопротивление ρ_2 принимаем равным 2,2 Ω.
Тогда

$$\rho = 4 \ \Omega,$$

$$\varepsilon_k = \frac{2 \cdot 7^2}{1,05 \cdot 4} + 23 \text{ V},$$

$$\varepsilon_B = 2 \text{ V}.$$

Потери в железе составляют приблизительно

$$W_e = 30\left(\frac{0,112}{0,123}\right)^2 = 25 \text{ W},$$

$$\varepsilon_e = \frac{25}{1,05} = 24 \text{ V},$$

$$\varepsilon = 30 + 23 + 2 + 24 = 79 \text{ V}.$$

Э. д. с. вращения:

$$E_r = \sqrt{2}\cdot 1344\cdot 50\cdot 0{,}112\cdot 10^{-2} = 106\ \text{V}$$

$$E_w = E_r + \varepsilon = 106 + 79 = 185\ \text{V}$$

$$E_{s1} = 4{,}44\cdot 50\cdot 2\cdot 200\cdot 1{,}05\cdot 0{,}112\cdot 10^{-2} = 104\ \text{V}$$

$$E_q = 0{,}085\cdot 50\,\frac{9{,}4\cdot 5{,}2}{0{,}09}\cdot 1{,}05\cdot 1344^2\cdot 10^{-8} = 44\ \text{V}$$

$$E_{ss} = 3\cdot 50\cdot 5{,}2\cdot 1{,}05\cdot 1344^2\cdot 10^{-8} = 15\ \text{V}$$

$$E_{bl} = 163\ \text{V}$$

$$E_k = \sqrt{185^2 + 163^2} = 248\ \text{V},$$

$$\cos\varphi = \frac{185}{248} = 0{,}745.$$

Вначале мы приняли $\varepsilon_p = 45\%$, а здесь получили

$$\varepsilon_p = \frac{79}{106}\cdot 100 = 75\%.$$

Благодаря ошибочности предварительного выбора ε_p величина E_k получилась слишком большой, $\cos\varphi$ слишком малым и сила тока слишком большой.

При $\cos\varphi = 0{,}75$ сила тока $I = 1{,}89$ A. Так как полученное выше трансформаторное напряжение $e_t = 7$ V несколько велико, то уменьшаем линейную нагрузку ротора до $AS = 65$. Тогда при $\varepsilon_p = 70\%$, $\delta'' = 0{,}105$ и $C = 11{,}3\cdot 10^{-6}$

$$u = \frac{11{,}3\cdot 0{,}105\cdot 100}{0{,}014\cdot 1{,}7\cdot 8\cdot 65^2} = 0{,}148,$$

$$w_2 = \frac{6\cdot\pi\cdot 65}{0{,}89} = 1380,$$

$$s_n = 2\cdot 3\cdot 29 = 174 \text{ на впадину},$$

$$w_2 = 174\cdot\frac{16}{2} = 1392.$$

Размеры проводника $d_2/d_2' = 32/0{,}47$ можно сохранить, так как 174 проводника как раз помещаются в одну впадину.

$$w_1 = 1392\cdot 0{,}148 = 206 \text{ на полюс},$$

$$AW_s = \sqrt{2}\cdot 0{,}89\cdot 206 = 260 \text{ на полюс}.$$

Этому значению на фиг. 37 соответствует:

$$\Phi_y = 0{,}10\cdot 10^6,$$

$$B_{l\,max} = \frac{0{,}10\cdot 10^6}{33} \cong 3000,$$

$$\delta'' = \frac{4\pi}{10} \cdot 206 \frac{\sqrt{2} \cdot 0,89}{3000} = 0,109 \text{ см},$$

$$R_2 = \frac{1392 \cdot 0,26}{4 \cdot 57 \cdot 0,0804} = 19,7 \ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_1 = \frac{2 \cdot 206 \cdot 0,294}{57 \cdot 0,442} = 4,8 \ \Omega \quad \text{„} \quad \text{„} \quad \text{„}$$

$$R = 1,2 \cdot 24,5 = 29,5 \ \Omega,$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0,89 \cdot 29,5 = 26,3 \ \text{V},$$

$$e_t = 4,44 \cdot 50 \cdot 29 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} = 6,45 \ \text{V},$$

$$\rho_1 = \frac{29 \cdot 0,26}{50 \cdot 0,0804} = 1,9 \ \Omega,$$

$$\rho_2 = 2,1 \ \Omega,$$

$$\rho = 4 \ \Omega,$$

$$\varepsilon_k = \frac{2 \cdot 6,45^2}{0,86 \cdot 4} = 23,4 \ \text{V},$$

$$W_e = 30\left(\frac{0,1}{0,123}\right)^2 = 20 \ \text{W},$$

$$\varepsilon_e = \frac{20}{0,89} = 22,5 \ \text{V},$$

$$\varepsilon = 26,3 + 23,4 + 2 + 22,5 = 74 \ \text{V}$$

$$E_r = \sqrt{2} \cdot 1392 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} = 99 \ \text{„}$$

$$E_w = 173 \ \text{V}$$

$$E_{s_1} = 4,44 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 206 \cdot 1,05 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} = 96 \ \text{V}$$

$$E_q = 0,085 \cdot 50 \frac{9,4 \cdot 5,2}{0,09} \cdot 0,89 \cdot 1392^2 \cdot 10^{-8} = 40 \ \text{„}$$

$$E_{ss} = 3 \cdot 50 \cdot 5,2 \cdot 0,89 \cdot 1392^2 \cdot 10^{-2} = 13,5 \ \text{„}$$

$$E_{bl} = 149,5 \ \text{V}$$

$$E_k = \sqrt{173^2 + 149,5^2} = 228 \ \text{V},$$

$$\cos\varphi = \frac{173}{228} = 0,758.$$

Коэфициент полезного действия.

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot I = 26,3 \cdot 0,89 = 23,4 \ \text{W}$$

$$\varepsilon_k \cdot I = 23,4 \cdot 0,89 = 20,8 \ \text{„}$$

$$\varepsilon_B \cdot I = 2 \cdot 0,89 = 1,8 \ \text{„}$$

$$\varepsilon_e \cdot I = 22,5 \cdot 0,89 = 20,0 \ \text{„}$$

Потери на трение = 20,0 „

$$W_g = 86 \ \text{W}$$

Потребляемая мощность

$$P_a = 220 \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}758 = 148 \text{ W}.$$

Отдаваемая мощность $P = 148 - 86 = 62$ W.

$$\eta = \frac{62}{148} \cdot 100 = 42\%.$$

Таким образом коэфициент полезного действия в первом предположении также ошибочен и требуется еще один перерасчет. Полагая $\eta = 0{,}45$, получим силу тока:

$$I = \frac{80}{0{,}45 \cdot 0{,}75 \cdot 220} = 1{,}08 \text{ A},$$

$$C = \frac{80}{0{,}45 \cdot 3000 \cdot 9{,}4^3 \cdot 5{,}2} = 13{,}7 \cdot 10^{-6};$$

при $\varepsilon_p = 75\%$, $\delta'' = 0{,}11$ и $u = 0{,}15$ получим:

$$AS^2 = \frac{13{,}7 \cdot 0{,}11 \cdot 100}{0{,}014 \cdot 1{,}75 \cdot 8 \cdot 0{,}15} = 5120,$$

$$AS = 71{,}5 \text{ см},$$

$$w_2 = \frac{6 \cdot \pi \cdot 71{,}5}{1{,}08} = 1244,$$

$$s_n = 2 \cdot 3 \cdot 26 = 156 \text{ на впадину},$$

$$w_2 = 156 \cdot 8 = 1248,$$

$$d_2/d_2' = 0{,}35/0{,}50 \text{ мм},$$

$$q_2 = 0{,}0962 \text{ мм}^2,$$

$$\Delta_2 = \frac{1{,}08}{2 \cdot 0{,}0962} = 5{,}6 \text{ A/мм}^2,$$

$$w_1 = 1248 \cdot 0{,}15 = 187,$$

$$AW_s = \sqrt{2} \cdot 1{,}08 \cdot 187 = 286.$$

Этому значению на фиг. 37 соответствует:

$$\Phi_y = 0{,}107 \cdot 10^6,$$

$$R_{l\,max} = \frac{0{,}107 \cdot 10^6}{33} = 3250,$$

$$R_2 = \frac{1248 \cdot 0{,}26}{4 \cdot 57 \cdot 0{,}0962} = 14{,}8\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_1 = \frac{2 \cdot 187 \cdot 0{,}294}{57 \cdot 0{,}442} = 4{,}35\ \Omega \quad \text{„} \quad \text{„} \quad \text{„}$$

$$R_1 + R_2 = 1{,}2 \cdot 19{,}15 = 23\ \Omega,$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 23 \cdot 1{,}08 = 25 \text{ V},$$

$$e_t = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 26 \cdot 0{,}107 \cdot 10^{-2} = 6{,}2 \text{ V};$$

при $\rho = 4\ \Omega$:

$$\varepsilon_k = \frac{2 \cdot 6{,}2^2}{1{,}08 \cdot 4} = 17{,}8 \text{ V}$$

$$\varepsilon_e = \frac{23}{1{,}08} = 21{,}2 \text{ V}$$

$$\varepsilon = 25 + 2 + 39 = 66 \text{ V}$$

$$E_r = \sqrt{2} \cdot 1248 \cdot 50 \cdot 0{,}107 \cdot 10^{-2} = 94{,}5 \text{ V}$$

$$E_w = 66 + 94{,}5 = 160{,}5 \text{ V}$$

$$E_{s_1} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 187 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}107 \cdot 10^{-2} = 93 \text{ V}$$

$$E_a = 0{,}085 \cdot 50 \frac{9{,}4 \cdot 5{,}2}{0{,}09} 1{,}08 \cdot 1248^2 \cdot 10^{-8} = 39 \text{ „}$$

$$E_{ss} = 3 \cdot 50 \cdot 5{,}2 \cdot 1{,}08 \cdot 1248^2 \cdot 10^{-8} = 13 \text{ „}$$

$$E_{bl} = 145 \text{ V}$$

$$E_k = \sqrt{160{,}5^2 + 145^2} = 216 \text{ V},$$

$$\cos\varphi = \frac{160{,}5}{216} = 0{,}74.$$

Коэфициент полезного действия.

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot I = 25 \cdot 1{,}08 = 27 \text{ W}$$

$$\varepsilon_k \cdot I = 17{,}8 \cdot 1{,}08 = 19{,}2 \text{ „}$$

$$\varepsilon_B \cdot I = 2 \cdot 1{,}08 = 2{,}2 \text{ „}$$

$$\varepsilon_e \cdot I = 21{,}2 \cdot 1{,}08 = 23{,}0 \text{ „}$$

Потери на трение $= 20$ „

$$W_g = 91{,}4 \text{ W}$$

$$P_a = 220 \cdot 1{,}08 \cdot 0{,}745 = 177{,}4 \text{ W},$$

$$P = 177{,}4 - 91{,}4 = 86 \text{ W},$$

$$\eta = 48{,}5\%.$$

Вследствие большего коэфициента полезного действия ток будет меньше, а именно:

$$I = 1{,}04 \text{ A}.$$

Далее $w_1 = 195$.

Тогда

$$R_1 = \frac{195}{187} \cdot 4{,}35 = 4{,}55\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_1 + R_2 = 1{,}2 \cdot 19{,}35 = 23{,}4\ \Omega,$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1{,}04 \cdot 23{,}4 = 24 \text{ V},$$

$$AW_s = \sqrt{2} \cdot 1{,}04 \cdot 195 = 287,$$

$$\Phi_y = 0{,}107 \cdot 10^6,$$

$$\varepsilon_k = \frac{1{,}03}{1{,}04} \cdot 17{,}8 = 18{,}5 \text{ V},$$

$$\varepsilon_e = \frac{23}{1,04} = 22,1 \text{ V}$$

$$\varepsilon = 24 + 2 + 40,6 = 66,6 \text{ V}$$

$$E_r = 94,5 \text{ „}$$

$$E_w = 161 \text{ V}$$

$$E_{s_1} = \frac{195}{187} \cdot 93 = 97,0 \text{ V}$$

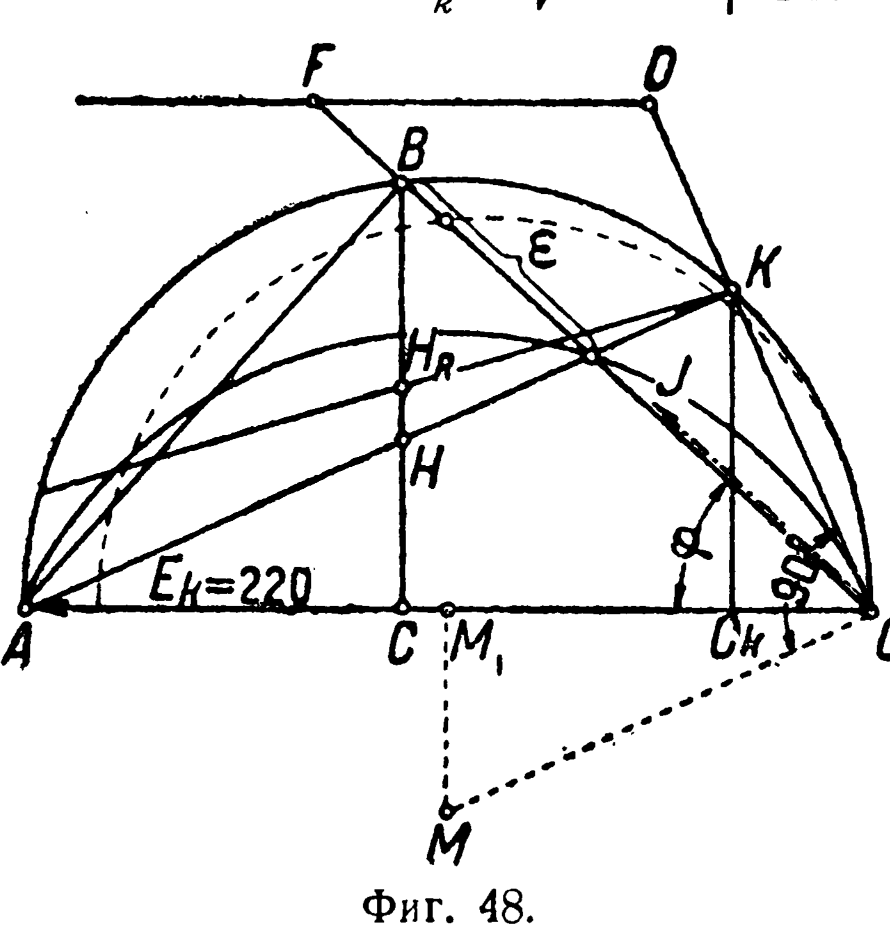
$$E_q = \frac{1,04}{1,08} \cdot 39 = 37,5 \text{ „}$$

$$E_{ss} = \frac{1,04}{1,08} \cdot 13 = 12,5 \text{ „}$$

$$E_{bl} = 147 \text{ V}$$

$$E_k = \sqrt{161^2 + 147^2} = 218 \text{ V},$$

$$\cos\varphi = \frac{161}{218} = 0,74.$$



Фиг. 48.

Полная потеря составляет теперь $66,6 \cdot 1,04 + 20 = 89$ W.

$P_a = 220 \cdot 1,04 \cdot 0,74 = 169$ W,
$P = 169 - 89 = 80$ W,
$\eta = 4,3\ \%$.

На фиг. 48 показана диаграмма двигателя. Максимальный момент всего в 1,85 раза больше, чем нормальный. Способность к перегрузке при малых числах оборотов значительно хуже, чем при больших.

Расчет машины как сериес-мотора постоянного тока.

Коэфициент полезного действия примем $\eta_{ge} = 66\%$, тогда сила тока

$$I_{ge} = \frac{80}{0,6 \cdot 220} = 0,61 \text{ A}.$$

Полагая сопротивление статора равным $R_1 = 30\ \Omega$, получим:

$$\varepsilon = 0,61\,(18 + 30) + 2 = 31 \text{ V},$$

$$\Phi_y = \frac{3000 \cdot (220 - 31)}{1248 \cdot 3000} \cdot 10^6 = 0,15 \cdot 10^6.$$

Этому значению по таблице, приведенной на стр. 56, соответствует:

$$AW_{L,Z,R} = 490.$$

Далее

$$AW_q = \frac{w_2 \cdot l_{ge} \cdot a_l}{2p \cdot 2a} = \frac{1248 \cdot 0,61 \cdot 2}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 127,$$

$$x = \frac{490}{127} = 3,86,$$

$$y = 0,15 \text{ (согласно фиг. 35)},$$

$$y \cdot AW_q = 0,15 \cdot 127 = 20$$

$$AW_R = 490 + 20 = 510$$

$$\underline{AW_{kj} = 110}$$

$$AW_s = 620,$$

$$w_1 = \frac{620}{0,61} = 1015.$$

Так как на каждом полюсе имеется уже 195 витков, то нужно добавить еще $1015 - 195 = 820$. Допуская $\Delta_1 = 3$, получим:

$$q_1 = \frac{0,61}{3} \cong 0,2 \text{ мм}^2,$$

$d_1/d_1' = 0,5/0,6$ (однократная обмотка хлопчатобумажной пряжей),

$q_1 = 0,196$ мм^2,

$R_{1(gl)} = \frac{2 \cdot 820 \cdot 0,294}{57 \cdot 0,196} = 43\ \Omega$ (в холодном состоянии),

$R_{1(gl)} = 52\ \Omega$ (в теплом состоянии),

$R_1 = 5,6\ \Omega$ (обмотка переменного тока),

$R_1 = 57,6\ \Omega.$

$\varepsilon = 0,61\,(57,6 + 18) + 2 = 48$ V, т. е. больше, чем принято вначале,

$$\Phi_y = \frac{(220 - 40)}{1248} = 0,144 \cdot 10^6.$$

Этому соответствует

$$AW_s = 520,$$

$$w_1 = \frac{520}{0,61} = 850.$$

Дополнительно $850 - 195 = 655$ витков.

$$R_{1(gl)}\ \frac{655}{820} \cdot 43 = 34,4/41\ \Omega,$$

$$\varepsilon = 0,61\,(46,6 + 18) + 2 = 41,4\ \text{V}$$

$$WR' = 0,85^2 \cdot 195 = 141 \text{ мм}^2$$

$$\underline{WR'' = 0,6^2 \cdot 655 = 236 \text{ мм}^2}$$

$$WR = 377 \text{ мм}^2$$

Места, занимаемого впадиной на фиг. 36, вполне достаточно для размещения обеих обмоток.

Коэфициент полезного действия.

Потоку $\Phi_y = 0{,}144 \cdot 10^6$ соответствует индукция в зубцах:

$$B_z = \frac{0{,}144 \cdot 10^6}{8{,}25} = 17\,500,$$

а индукция в теле ротора:

$$B_R = \frac{0{,}144 \cdot 10^6}{11{,}2} = 12\,800,$$

$$\frac{D}{2p2\delta'} = \frac{60}{2 \cdot 1{,}8} = 16{,}7.$$

Зубцы:

Потеря на гистерезис:

$$W_{hz} = 6{,}5 \cdot 50 \cdot 17\,500^2 \cdot 0{,}23 \cdot 10^{-10} = 2{,}3 \text{ W}.$$

Потеря на вихревые токи:

$$W_{wz} = 16{,}7 \cdot 0{,}032 \cdot 50^2 \cdot 17\,500^2 \cdot 0{,}23 \cdot 10^{-10} = 9{,}5 \text{ W}.$$

Тело ротора:

Потеря на гистерезис:

$$W_{hR} = 6{,}5 \cdot 50 \cdot 12\,800^2 \cdot 0{,}33 \cdot 10^{-10} = 1{,}7 \text{ W}$$

Потеря на вихревые токи:

$$W_{wR} = 0{,}032 \cdot 50^2 \cdot 12\,800^2 \cdot 0{,}33 \cdot 10^{-10} = 0{,}5 \text{ W}$$

$$W_e = 14 \text{ W}$$

Потеря в меди роторной и статорной обмоток — 39,4·0,61	= 24 W
Переходная потеря на коллекторе	= 1,2 W
Потеря в железе	= 14 W
Трение	= 20 W
	$W_g = 59{,}2$ W

Потребляемая мощность

$$P_a = 220 \cdot 0{,}61 = 134 \text{ W},$$

Отдаваемая мощность

$$P = 134 - 59 = 75 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{75}{134}\, 100 = 56\,\%.$$

Таким образом сила тока при нормальной нагрузке $I = 0{,}63$ А.

Обусловленное этим увеличение числа ампервитков вызовет, однако, весьма незначительное увеличение потока, так что в результате число оборотов будет лишь незначительно меньше, чем 3000. Для предосторожности можно уменьшить число витков обмотки

возбуждения постоянного тока, приходящееся на один полюс, взяв вместо 850 витков 820.

Коллектор.

Наименьшее число пластин должно быть:

$$K_{\min} = a \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right) \frac{E_r}{2} = \frac{94,5}{2} \cong 48.$$

Принимаем $K = 48$, тогда трансформаторное напряжение $\cong 2\pi$ V.

Реактивное напряжение.

Линейная скорость:

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0,06 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 9,4 \text{ м/сек.}$$

Для работы на переменном токе:

$$AS = \frac{1248 \cdot 1,04}{6\pi} = 69.$$

Для работы на постоянном токе:

$$AS = \frac{0,63}{1,04} 69 = 42.$$

Тогда для переменного тока:

$$e_R = 20 \cdot 4,7 \cdot 26 \cdot 69 \cdot 9,4 \cdot 10^{-8} \cong 1,6 \text{ V.}$$

Для постоянного тока:

$$e_R = \frac{42}{69} \cdot 1,6 = 0,97 \text{ V.}$$

Как двигатель постоянного тока машина будет иметь вполне безыскровую коммутацию; при работе же ее двигателем переменного тока искрение будет настолько незначительно, что никакой опасности при длительной работе возникнуть не может.

Естественно, что здесь мы можем воспользоваться без всякого изменения и тем коллектором, который был рассчитан в первом примере.

В настоящем примере проведен целый ряд перерасчетов, чтобы показать, какие трудности приходится преодолеть для получения удовлетворительно рассчитанной машины. При изменении одной величины сейчас же изменяется столько других, что результат этого изменения нельзя предусмотреть заранее. В этом случае помогает только новый пересчет, как это и показано в настоящем примере.

Расчет универсального двигателя на 80 W, 220 V, 50 циклов, 1500 об/мин, $2p = 4$

Частота в роторе:

$$f_2 = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50.$$

Таким образом снова $f_1 = f_2$, т. е. нормальным числом оборотов двигателя будет синхронное. Обмотку ротора возьмем чисто последовательную, т. е. $2a = 2$.

Определение основных размеров.

Из предыдущего примера видно, что величина $\varepsilon_p \cong 80\%$.
Далее примем: $\delta'' = 0,12$ *см*,

$$u = 0,08,$$
$$AS = 95,$$
$$\eta = 50\%.$$

Согласно уравнению (30a),

$$C = 0,014 \cdot 1,8 \cdot 64 \cdot \frac{0,08}{0,12} \cdot 95^2 \cdot 10^{-8} = 97 \cdot 10^{-6}.$$

Из уравнения (32) следует, что

$$\tau_p{}^3 l = \frac{P}{\eta \cdot C \cdot n} = \frac{80 \cdot 10^6}{0,5 \cdot 97 \cdot 1500} = 1100.$$

При диаметре $D = 7,5$ *см* получаем:

$$\tau_p = \frac{D \cdot \pi}{2p} = \frac{7,5 \cdot \pi}{4} = 5,9 \text{ см},$$

$$b_l = \frac{2}{3}\tau_p = \frac{2}{3} \cdot 5,9 \cong 4 \text{ см},$$

$$l = \frac{1100}{5,9^3} = 5,35 \text{ см}.$$

Окончательно примем:

$$l = 54 \text{ мм},$$
$$Q_l = b_l \cdot l = 4,54 = 21,6 \text{ см}^2.$$

Согласно уравнению (18), при $k_2 = 0,055$:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon_p}{100}}\left[4\pi \cdot \sigma \cdot u = \frac{k_2}{u}\right] = \frac{1}{1,8}\left[4 \cdot \pi \cdot 1,05 \cdot 0,08 + \frac{0,055}{0,08}\right],$$

$$\operatorname{tg}\varphi = 0,966,$$
$$\cos\varphi = 0,72.$$

Сила тока:

$$I = \frac{80}{0{,}5 \cdot 0{,}72 \cdot 220} \cong 1 \text{ А}.$$

Число витков ротора:

$$w_2 = \frac{D \cdot \pi \cdot AS \cdot a}{I} = \frac{7{,}5 \cdot \pi \cdot 95}{1} = 2205.$$

При числе впадин $z_n = 21$ число проводников на впадину:

$$S_n = \frac{2 \cdot 2205}{21} = 210,$$

$$S_n = 2 \cdot 3 \cdot 35.$$

Число коллекторных пластин примем $K = 21 \cdot 3 = 63$.

В каждой секции ротора будет $\frac{w_2}{K} = 35$ витков.

Далее

$$w_1 = \frac{w_2'}{a} \cdot u = 2205 \cdot 0{,}08 = 176 \text{ на полюс},$$

$$B_{l\,\max} = \frac{4\pi}{10} \cdot 176 \frac{\sqrt{2} \cdot 1}{0{,}12} = 2600,$$

$$\Phi_y = B_{l\,\max} \cdot Q_l = 2600 \cdot 21{,}6 = 0{,}0565 \cdot 10^6.$$

Высоту впадины можно взять $0{,}25 \cdot D$, так как высота ротора может быть здесь значительно меньше, чем в двухполюсной конструкции:

$$h_n = 0{,}25 \cdot 7{,}5 \cong 19 \text{ мм}.$$

Высоту зазора впадины снова возьмем равной 1 *мм*, и тогда зубцовый шаг посредине высоты впадины:

$$t_n = \frac{(73 - 18)\pi}{21} = 8{,}23 \text{ мм}.$$

При толщине зубца в 3 *мм*, ширина впадины будет составлять $b_n = 5{,}23$ *мм*.

Площадь впадины:

$$F_n = 18 \cdot 5{,}23 \cdot 0{,}95 = 89 \text{ мм}^2,$$

$$WR = 0{,}6 \cdot F_n = 0{,}6 \cdot 89 = 53 \text{ мм},$$

$$d_2' = \sqrt{\frac{WR}{S_n}} = \sqrt{\frac{53}{210}} = 0{,}5 \text{ мм}.$$

При двукратной шелковой изоляции:

$$d_2 = 0{,}4 \text{ мм},$$
$$q_2 = 0{,}126 \text{ мм}^2,$$
$$\Delta_2 = \frac{1}{2 \cdot 0{,}026} \cong 4 \text{ А/мм}^2.$$

Полюсное деление на середине высоты зубцов:

$$\tau_p' = \frac{(7{,}3 - 1{,}8)\,\pi}{4} = 4{,}3 \text{ см}.$$

Средняя длина витка:

$$m_2 = 2\,(l + 1{,}4\,\tau_p') = 2\,(5{,}4 + 1{,}4 \cdot 4{,}3) = 22{,}8 \text{ см},$$
$$R_2 = \frac{w_2 \cdot m_2}{(2a)^2 \cdot k \cdot q_2} = \frac{2205 \cdot 0{,}228}{4 \cdot 57 \cdot 0{,}126} = 17{,}5\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$
$$R_2 = 21\ \Omega \text{ (в теплом состоянии)}.$$

Для статорной обмотки примем плотность тока $\Delta_1 = 2{,}5$ А/мм². При этом

$$q_1 = \frac{1}{2{,}5} \doteq 0{,}4 \text{ мм}^2,$$

$d_1/d_1' = 0{,}75/0{,}85$ (однократная обмотка хлопчатобумажной пряжей),

$$q_1 = 0{,}442 \text{ мм}^2,$$
$$m_1 = 2\,(5{,}5 + 6{,}9) = 24{,}8 \text{ см},$$
$$R_1 = \frac{4 \cdot 176 \cdot 0{,}248}{57 \cdot 0{,}442} = 7\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$
$$R_1 = 8{,}4\ \Omega \text{ (в теплом состоянии)},$$
$$R_1 = R_2 = 8{,}4 + 21 = 29{,}4\ \Omega,$$
$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1 \cdot 29{,}4 = 29{,}4 \text{ V}.$$

Трансформаторное напряжение:

$$e_t = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 35 \cdot 0{,}0565 \cdot 10^{-2} = 4{,}4 \text{ V}.$$

Сопротивление одной секции ротора:

$$\rho_1 = \frac{35 \cdot 0{,}228}{50 \cdot 0{,}126} = 1{,}27\ \Omega,$$

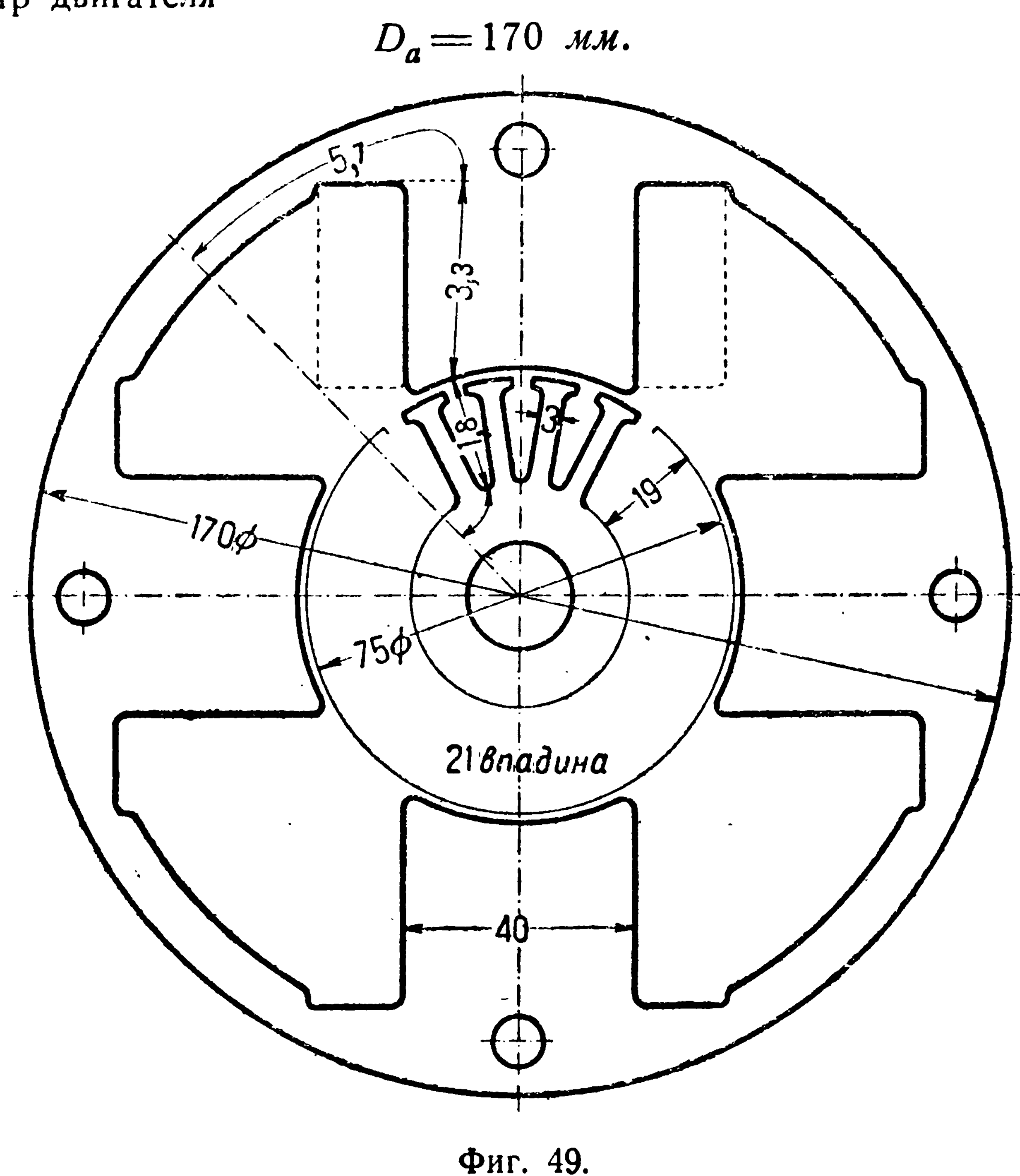
ρ_2 принимаем равным 1,73 Ω,

$$\rho = 3\ \Omega,$$
$$\varepsilon_k = \frac{2p \cdot e_t^2}{\rho \cdot I} = \frac{4}{3} \cdot 4{,}4^2 = 26 \text{ V},$$
$$\varepsilon_B = 2 \text{ V}.$$

Определение потерь в железе.

На фиг. 49 показан разрез двигателя, причем принята во внимание необходимость размещения двух обмоток возбуждения. Сечение ярма определяется индукцией $B_j \cong 8000$. Тогда наружный диаметр двигателя

$$D_a = 170 \text{ мм}.$$



Фиг. 49.

Веса отдельных частей:

1. Ярмо $G_{ej} = 16{,}2 \cdot \pi \cdot 0{,}8 \cdot 5{,}4 \cdot 0{,}9 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 1{,}54$ *кг*
2. Сердечники $G_{ek} = 4 \cdot 4 \cdot 3{,}5 \cdot 5{,}4 \cdot 0{,}9 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 2{,}13$ „
3. Зубцы $G_{ez} = 21 \cdot 0{,}3 \cdot 1{,}9 \cdot 5{,}4 \cdot 0{,}9 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 0{,}45$ „
4. Тело ротора $G_{eR} = 2{,}7 \cdot \pi \cdot 0{,}95 \cdot 5{,}4 \cdot 0{,}9 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 0{,}30$ „

Часть машины	Сечение ($см^2$)	Индукция ($\Phi_y = 0{,}0565 \cdot 10^6$)
Ярмо	7,8	7 600
Сердечник	19,4	3 160
Зубцы	5,2	10 800
Тело ротора	9,2	6 100

$$W_{ej} = 7 \cdot 0{,}76^2 \cdot 1{,}54 = 6{,}2 \text{ W}$$
$$W_{ek} = 7 \cdot 0{,}316^2 \cdot 2{,}13 = 1{,}5 \text{ „}$$
$$W_{ez} = 14 \cdot 1{,}08^2 \cdot 0{,}45 = 7{,}4 \text{ „}$$
$$W_{eR} = 14 \cdot 0{,}61^2 \cdot 0{,}30 = 1{,}5 \text{ „}$$
$$W_e = 16{,}6 \text{ W}$$

$$\varepsilon_e = \frac{W_e}{I} = \frac{16{,}6}{1} = 16{,}6 \text{ V}$$

$$\varepsilon = 29{,}4 + 26 + 2 + 16{,}6 = 74 \text{ V}$$
$$E_r = \sqrt{2} \cdot 2205 \cdot 50 \cdot 0{,}0565 \cdot 10^{-2} = 88 \text{ V}$$
$$E_w = 162 \text{ V}$$

$$\varepsilon_p = \frac{74}{88} \cdot 100 = 84\% \text{ (принимаем } \varepsilon_p = 80\%\text{).}$$

$$E_{s_1} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 176 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}0565 \cdot 10^{-2} = 92{,}6 \text{ V}$$
$$E_q = 0{,}34 \cdot \frac{50}{2 \cdot 4} \cdot \frac{5{,}9 \cdot 5{,}4}{0{,}1} \cdot 1 \cdot 2205^2 \cdot 10^{-8} = 33{,}0 \text{ „}$$
$$E_{ss} = \frac{14}{2 \cdot 4} \cdot 50 \cdot 5{,}4 \cdot 1 \cdot 2205^2 \cdot 10^{-8} = 23{,}0 \text{ „}$$
$$E_{bl} = 148{,}6 \text{ V}$$
$$E_k = \sqrt{162^2 + 148{,}6^2} = 220 \text{ V},$$
$$\cos\varphi = \frac{162}{220} = 0{,}735.$$

Коэфициент полезного действия.

$$\varepsilon \cdot I = 74 \cdot 1 = 74 \text{ W}$$
Трение равно 8 „

Потребляемая мощность

$$P_a = 220 \cdot 1 \cdot 0{,}735 = 162 \text{ W}$$
$$W_g = 82 \text{ „}$$
$$P = 80 \text{ W}$$

$\eta = 50\%$, как было предусмотрено.

Часть машин	Q	l	$\Phi = 0{,}0565 \cdot 10^6$			$\Phi = 0{,}04 \cdot 10^6$		
			B	aw	AW	B	aw	AW
Воздушный промежуток	21,6	0,105	2 620	—	220	1 850	—	156
Зубцы	5,2	1,8	10 800	3,8	7	7 700	1,9	3
Тело ротора . .	9.2	1	6 100	1 5	1,5	4 350	1,1	1
Сердечник . . .	19,4	3,3	3 100	1	3,5	2 160	1	3
Ярмо	7,8	5,7	7 600	1,9	11	5 400	1,3	8
				$\Sigma = 243$			$\Sigma = 171$	

Часть машин	Q	l	$\Phi = 0.075 \cdot 10^6$			$\Phi = 0,1 \cdot 10^6$		
			B	aw	AW	B	aw	AW
Воздушный промежуток	21,6	0,105	3 470	—	291	4 630	—	389
Зубцы	5,2	1,8	14 400	12	22	19 200	200	360
Тело ротора	9,2	1	8 170	2,1	2	10 900	4	4
Сердечник	19,4	3,3	4 060	1	3	5 400	1,3	4
Ярмо	7,8	5,7	10 100	3	17	13 500	10	57
					$\Sigma = 335$			$\Sigma = 814$

Магнитная цепь.

При $\delta = 0,95$ *мм* и при $b_s = 3$ *мм*

$$t_{n_1} = \frac{75 \cdot \pi}{21} = 11,2,$$

$$a = \frac{b_s}{\delta} = \frac{3}{0,95} = 3,15,$$

$$\beta = \frac{b_s}{t_{n_1}} = \frac{3}{11,2} = 0,268,$$

$$k_l = \frac{1}{1 - \frac{3 \cdot 15 \cdot 0,268}{8,15}} = 1,11,$$

$$\delta' = 0,095 \cdot 1,11 = 0,105 \text{ см}.$$

При этом значении рассчитана предыдущая таблица.

Для создания потока

$$\Phi_y = 0,0565 \cdot 10^6$$

необходимо иметь 243 ампервитка на полюс.

При силе тока

$$I = 1 \text{ A}$$

мы получаем:

$$\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 176 = 250$$

ампервитков.

Таким образом воздушный промежуток

$$\delta = 0,95 \text{ мм}$$

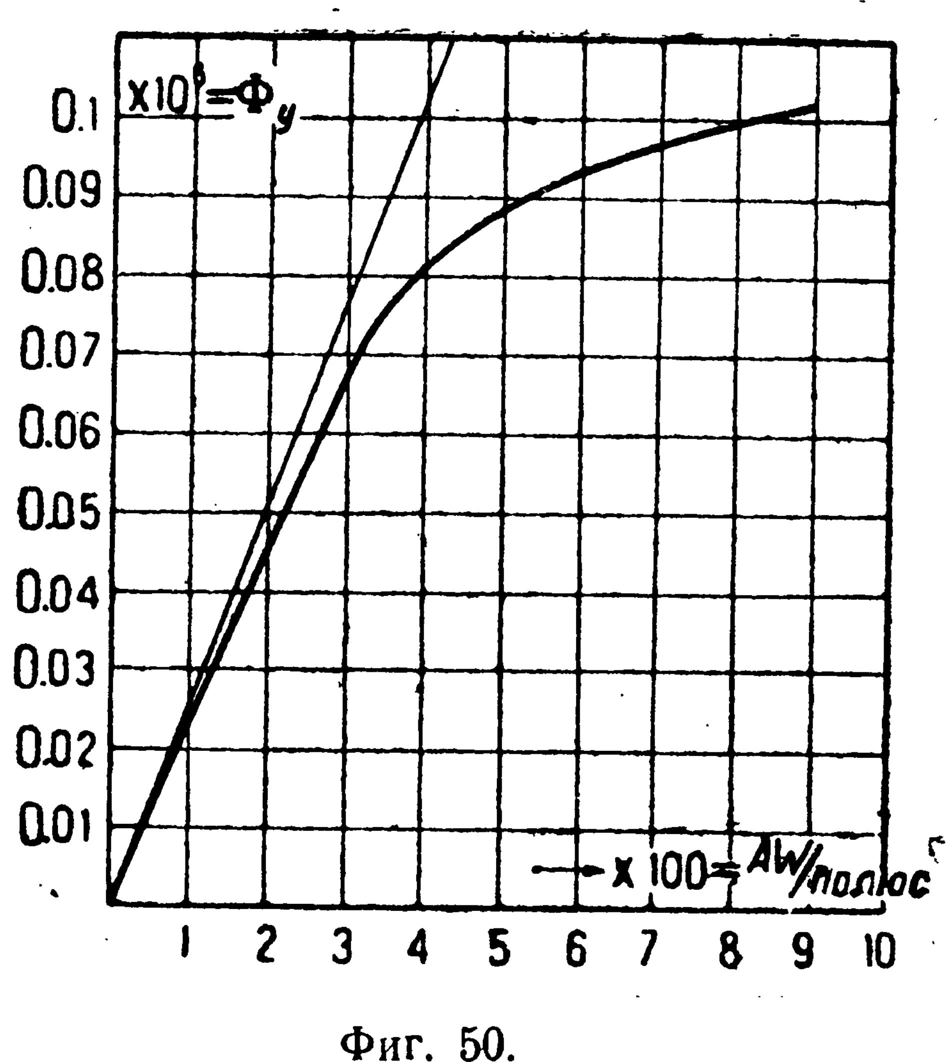
выбран нами правильно.

Кривая намагничивания показана на фиг. 50.

Реактивное напряжение.

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0{,}075 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 5{,}9 \ \text{м/сек},$$

$$e_R = 20 \cdot 4{,}9 \cdot 35 \cdot 95 \cdot 5{,}9 \cdot 10^{-8} = 1{,}92 \ \text{V}.$$



Фиг. 50.

Коллектор и щетки.

Наименьшее число коллекторных пластин

$$K_{\min} = a \cdot \frac{f_1}{f_2} \cdot \frac{E_r}{2} = \frac{88}{2} = 44.$$

Диаметр коллектора примем

$$D_k = 70 \ \text{мм};$$

тогда коллекторное деление

$$t_k = \frac{70 \cdot \pi}{63} = 3{,}5 \ \text{мм}.$$

На каждом из четырех щеточных болтов помещаем одну щетку размером 3×10 *мм*. Осевую длину сегментов возьмем равной 15 *мм*.

Расчет машины как двигателя постоянного тока.

Коэфициент полезного действия примем предварительно равным $\eta = 60\%$. Тогда сила тока:

$$I = \frac{80}{0{,}6 \cdot 220} = 0{,}61 \ \text{A}.$$

Общее сопротивление статорной обмотки примем равным $40 \ \Omega$; тогда

$$\varepsilon = 0{,}61\,(21 + 40) + 2 \cong 40 \ \text{V},$$

$$\Phi_y = \frac{3000 \cdot 180}{2 \cdot 1500 \cdot 2205} = 0{,}082 \cdot 10^6.$$

Согласно фиг. 50, этому значению соответствует:

$$AW_{s_0} = 400,$$

$$AW_q = \frac{\frac{2}{3} \cdot 0{,}61 \cdot 2205}{2{,}4} = 112 \ \text{на полюс};$$

$$\frac{AW_{L,Z,R}}{AW_q} = x \cong \frac{360}{112} = 3{,}2.$$

Этой величине соответствует:

$$y = 0,17.$$

Тогда

$$y \cdot AW_q = 0,17 \cdot 112 \cong 20,$$
$$AW_{sb} = 420,$$
$$w_{1(gl)} = \frac{420}{0,61} = 690.$$

Добавочная обмотка постоянного тока будет содержать:

690 — 176 = 514 витков.

Диаметр проводника 0,6/0,7 *мм*.

Сечение проводника $q_{1(gl)} = 0,283$ *мм*².

$$R_{1(gl)} = \frac{4 \cdot 514 \cdot 0,248}{57 \cdot 0,283} = 32\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_{1(gl)} = 38\ \Omega \text{ (в теплом состоянии)}.$$

Полное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 = 38 + 8,4 = 46,4\ \Omega,$$
$$R_1 + R_2 = 46,4 + 21 = 67,4\ \Omega,$$
$$\varepsilon = 67,4 \cdot 0,61 + 2 = 43\ V.$$

Выше мы приняли $\varepsilon = 40$ V. Разница в предварительно принятом и найденном значениях настолько мала, что пересчет является излишним.

$$WR' = 176 \cdot 0,85^2 = 126 \text{ мм}^2,$$
$$WR'' = 514 \cdot 0,7^2 = 254 \text{ „}$$
$$WR = 380 \text{ мм}^2$$

Площадь, необходимая для размещения статорных обмоток при 80% использования, должна, таким образом, иметь величину:

$$F_{n_1} = \frac{380}{0,8} = 475 \text{ мм}^2 = 15 \times 32 \text{ мм}.$$

Из фиг. 49, представляющей поперечное сечение двигателя, видно, что в нашем распоряжении имеется площадь, даже несколько превосходящая эти размеры.

Реактивное напряжение.

$$AS = \frac{0,61}{1} \cdot 95 = 58,$$

$$e_{R'(gl)} = \frac{0,61}{1} \cdot 1,92 = 1,17\ V.$$

Коммутация машины как двигателя постоянного тока будет, таким образом, безупречна.

Коэфициент полезного действия.

Магнитному потоку

$$\Phi_y = 0{,}082 \cdot 10^6$$

соответствует:

$$B_z = \frac{0{,}082 \cdot 10^6}{5{,}2} = 15\,800,$$

$$B_R = \frac{0{,}082 \cdot 10^6}{9{,}2} = 8900$$

$$\frac{D}{2p \cdot 2\delta'} = \frac{75}{4 \cdot 2 \cdot 1{,}05} = 9,$$

$$\begin{aligned}
W_{hz} &= 6{,}5 \cdot 50 \cdot 15\,800^2 \cdot 0{,}45 \cdot 10^{-10} &&= 3{,}7 \text{ W} \\
W_{wz} &= 9 \cdot 0{,}032 \cdot 50^2 \cdot 15\,800^2 \cdot 0{,}45 \cdot 10^{-10} &&= 8{,}1 \text{ „} \\
W_{hR} &= 6{,}5 \cdot 50 \cdot 8900^2 \cdot 0{,}3 \cdot 10^{-10} &&= 0{,}8 \text{ „} \\
W_{wR} &= 0{,}032 \cdot 50^2 \cdot 8900^2 \cdot 0{,}3 \cdot 10^{-10} &&= 0{,}2 \text{ „} \\
& && W_e = 12{,}8 \text{ W}
\end{aligned}$$

Потери в меди	$43 \cdot 0{,}61$	$= 26{,}3$ W
„ „ железе		$= 12{,}8$ „
„ на трении		$= 8{,}0$ „
		$W_g = 47{,}0$ W

Потребляемая мощность

$$220 \cdot 0{,}61 = 134 \text{ W}.$$

Отдаваемая мощность

$$134 - 47 = 87 \text{ W},$$

$$\eta = 65\%.$$

Таким образом сила тока будет равной не 0,61 A, а лишь около 0,58 A. Повысим число витков до $\frac{420}{0{,}58} = 726$.

Тогда дополнительная обмотка постоянного тока будет содержать $726 - 176 = 550$ витков.

Далее

$$R_{1(gl)} = \frac{550}{514} \cdot 32 = 34\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_{1(gl)} = 40{,}5\ \Omega \text{ (в теплом состоянии)},$$

$$R_1 = 40{,}5 + 8{,}4 \cong 49\ \Omega,$$

$$R_1 + R_2 = 49 + 21 = 70\ \Omega,$$

$$\varepsilon = 70 \cdot 0{,}58 + 2 = 42{,}5 \text{ V}.$$

Коэфициент полезного действия.

Потери в меди $42{,}5 \cdot 0{,}58 = 24{,}7$ W
„ в железе $= 12{,}8$ „
„ на трение $= 8$ „

$W_g = 45{,}5$ W

$P_a = 220 \cdot 0{,}58 = 127{,}5$
$W_g = 45{,}5$

$P = 82$
$\eta = 64\%$.

В заводских условиях целесообразно все данные сводить в особую таблицу, так называемый формуляр, примерная схема которого показана ниже.

№ машины 78 911. Текущий № 2254/24.

Место изготовления Берлин. Время изготовления 15.8.31.

Тип двигателя . . . . UM 4	Модель . . . . CM $\frac{7{,}5}{5{,}4}$
Мощность продолжительная . . . . 80 W	Конструкция открытая
Напряжение . . . . . . 220 V	Схема включения . . . RS 20
Частота . . . . 50 цикл.	. . . .
Число оборотов в мин. 1500	. . . .
Сила тока . . . . . 1/0,58 A	. . . .
Коэфициент мощности . . 0,73	

Ротор	Статор
Диаметр внешний 75	Диаметр выточки . . . 76,9
Диаметр внутренний . . . 18	Сорт железа . . . . A
Осевая длина 54	Внешний диаметр . . . 170
Число впадин 21	Ширина сердечника . . . 40
Размеры впадин . . . W R = 53	Число полюсов 4
Сорт железа . . . . . A	Сечение ярма ($см^2$) 7,8
Бандажи . . . . . . нет	Обмоточное пространство на полюс ($мм^2$) . 420
Клин . . . . задвижной	
Воздушный промежуток $\delta = 0{,}95$	

Коллектор	Роторная обмотка
Внешний диаметр . . $D_k = 70$	Число полюсов . . . $2p = 4$
Полезная длина пластины . . 15	Число параллельных ветвей . . . . $2a = 2$
Число пластин 63	Диаметр голого проводника 0,4
Профиль пластин . . . KL 17	Диаметр изолированного проводника 0,5

Число болтов 4	Изоляция — шелковая
Число щеток на болт 1	Число проводников во впадине 210
Размеры щеток . . . . 3 × 10	Число секционных сторон . . . . 2 × 3
Сорт щеток . . . . XS	Число витков в секции . . . 35
Тип щеткодержателя . . KM III	Шаг по впадинам 5
	Шаг по коллектору 31
	Сопротивление (в хол. сост.) . . . . 17,5 Ω
	Вес обмотки 0,57

Статорная обмотка

	Обмотка для переменного тока	Обмотка для постоянного тока
Материал обмотки	медь	медь
Число катушек на полюс	1	1
Число витков в катушке	176	550
Диаметр голого проводника	0,75	0,6
Диаметр изолированного проводника . .	0,85	0,7
Изоляция	однократн. хлоп. бум.	однократн. хлоп. бум.
Сопротивление R_1 (в хол. сост.)	7 Ω	34 Ω
Вес обмотки (*кг*)	0,7	1,4
Схема включения катушек	(— —)	(— —)

Расчет сериес-двигателя переменного тока на 1 kW, 220 V, 50 циклов, 6000 об/мин

Выбираем двухполюсную конструкцию, тогда $\frac{f_1}{f_2}=0,5$, что позволит получить достаточно высокий коэфициент мощности.

При

$$\eta = 75\%,$$
$$AS = 110,$$
$$\varepsilon_p = 15\%,$$
$$u = 0,16,$$
$$\delta'' = 0,2,$$

согласно уравнению (30а),

$$C = 0,014 \cdot 1,15 \cdot 8 \cdot \frac{0,16}{0,2} \cdot 110^2 \cdot 10^{-8} = 12,5 \cdot 10^{-6},$$

$$\tau_p{}^3 \cdot l = \frac{P}{\eta \cdot C \cdot n} = \frac{1000 \cdot 10^6}{0,75 \cdot 12,5 \cdot 6000} = 17\,800.$$

При $D=9$ *см* получаем

$$\tau_p=\frac{\pi}{2}\cdot D=1,57\cdot 9=14,1 \text{ см},$$

$$l=\frac{17\,800}{14,1^3}=6,3 \text{ см}.$$

Примем окончательно

$$l=65 \text{ мм}.$$

Взявши $k_2=0,086$, получим, согласно уравнению (18):

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{1}{1,15}\cdot 0,5\left[2\pi\cdot 1,05\cdot 0,16+\frac{0,086}{0,16}\right]=0,69,$$

$$\cos\varphi=0,82,$$

$$I=\frac{1000}{0,75\cdot 0,82\cdot 220}=7,4 \text{ A},$$

$$w_2=\frac{D\cdot\pi\cdot AS\cdot a}{I}=\frac{9\cdot\pi\cdot 110}{7,4}=420.$$

При числе впадин $z_n=20$, получим

$$s_n=\frac{2\cdot 420}{20}=42=2\cdot 3\cdot 7.$$

Число коллекторных пластин будет тогда:

$$K=20\cdot 3=60$$

и каждая секция ротора будет содержать

$$\frac{w_2}{K}=\frac{420}{60}=7 \text{ витков},$$

$$w_1=420\cdot 0,16=67 \text{ на полюс},$$

$$b_l=a_l\cdot\tau_p=\frac{2}{3}\cdot 14,1=9,4 \text{ см},$$

$$Q_l=9\cdot 4\cdot 6,5=61 \text{ см}^2,$$

$$B_{l\,max}=\frac{4\pi}{10}\cdot 67\cdot\frac{\sqrt{2}\cdot 7,4}{0,2}=4.400,$$

$$\Phi_y=4400\cdot 61=0,268\cdot 10^6.$$

Высота впадины

$$h_n=0,2\cdot D=18 \text{ мм},$$

$$t_n=\frac{(88-17)\pi}{20}=11,1 \text{ мм},$$

$$b_n=0,6\cdot t_n\cong 6,6 \text{ мм}.$$

Толщина зубца 4,5 *мм*,

$$t_{n_1} = \frac{D \cdot \pi}{z_n} = \frac{90 \cdot \pi}{20} = 14,1 \text{ мм}.$$

Под одним полюсом будут находиться:

$$\frac{b_l}{t_{n_1}} = \frac{94}{14,1} = 6,7 \text{ зубцов},$$

$$Q_z = 6,7 \cdot 0,45 \cdot 6,5 \cdot 0,9 = 17,6 \text{ см}^2,$$

$$B_{z\,max} = \frac{\Phi_y}{Q_z} = \frac{0,268 \cdot 10^6}{17,6} = 15\,200.$$

Диаметр вала с точки зрения критического числа оборотов выбираем $d_w = 25$ *мм*. Высота тела ротора получится тогда равной

$$h_R = 14,5 \text{ мм},$$

$$Q_R = 2 \cdot 1,45 \cdot 6,5 \cdot 0,9 = 17 \text{ см}^2,$$

$$B_R = \frac{\Phi_y}{Q_R} = \frac{0,268 \cdot 10^6}{17} = 15\,750.$$

Полная площадь впадины

$$F_n = 17 \cdot 6,6 \cdot 0,95 = 106 \text{ мм}^2,$$

где коэфициент 0,95 учитывает закругление углов.

Полезная площадь впадины

$$WR = 0,6 \cdot F_n = 0,6 \cdot 106 = 63,6 \text{ мм}^2,$$

$$d_2' = \sqrt{\frac{WR}{s_n}} = \sqrt{\frac{63,6}{42}} = 1,2 \text{ мм},$$

$d_2 = 1,0$ *мм* при двукратной хлопчатобумажной изоляции.

$$q_2 = 0,785 \text{ мм}^2,$$

$$\Delta_2 = \frac{7,4}{2 \cdot 0,785} = 4,7 \text{ А/мм}^2,$$

$$m_2 = 2\,(l + 1,3\,D) = 2\,(6,5 + 1,3 \cdot 9) = 36,4 \text{ см},$$

$$R_2 = \frac{420 \cdot 0,364}{4 \cdot 57 \cdot 0,785} = 0,85\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_2 = 1\ \Omega \text{ (в теплом состоянии)}.$$

Принимая плотность тока в статорной обмотке

$$\Delta_1 = 3 \text{ А/мм}^2,$$

получим:

$$q_1 = \frac{I}{\Delta_1} = \frac{7{,}4}{3} \cong 2{,}5 \text{ мм}^2,$$

$$\frac{d_1}{d_1'} = \frac{1{,}8}{2{,}0} \text{ мм},$$

$$q_1 = 2{,}545 \text{ мм}^2,$$

$$\Delta_1 = 2{,}9 \text{ А/мм}^2,$$

$$m_1 = 2(10 + 8) = 36 \text{ см},$$

$$R_1 = \frac{2 \cdot 67 \cdot 0{,}36}{57 \cdot 2{,}545} = 0{,}33\ \Omega \text{ (в холодном состоянии)},$$

$$R_1 = 0{,}4\ \Omega \text{ (в теплом состоянии)},$$

$$R_1 + R_2 = 1{,}4\ \Omega,$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 7{,}4 \cdot 1{,}4 = 10{,}3 \text{ V}.$$

Трансформаторное напряжение:

$$e_t = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 7 \cdot 0{,}268 \cdot 10^{-2} = 4{,}16 \text{ V}.$$

Сопротивление одной секции

$$\rho_1 = \frac{7 \cdot 0{,}364}{50 \cdot 0{,}785} = 0{,}065\ \Omega$$

$$\rho_2 \text{ (принимаем предварительно)} = 0{,}335 \text{ »}$$

$$\rho = 0{,}4\ \Omega$$

$$\varepsilon_k = \frac{2p \cdot e_t^2}{I \cdot \rho} = \frac{2 \cdot 4{,}16^2}{7{,}4 \cdot 0{,}4} = 11{,}7 \text{ V},$$

$$e_B = 2 \text{ V}.$$

Приблизительный подсчет потерь в железе.

При индукции в ярме $B_j = 10\,000$ получаем сечение ярма:

$$Q_j = \frac{0{,}268 \cdot 1{,}05 \cdot 10^6}{20\,000} = 14 \text{ см}^2.$$

Тогда радиальная толщина ярма:

$$\frac{14}{0{,}9 \cdot 6{,}5} = 2{,}4 \text{ см}.$$

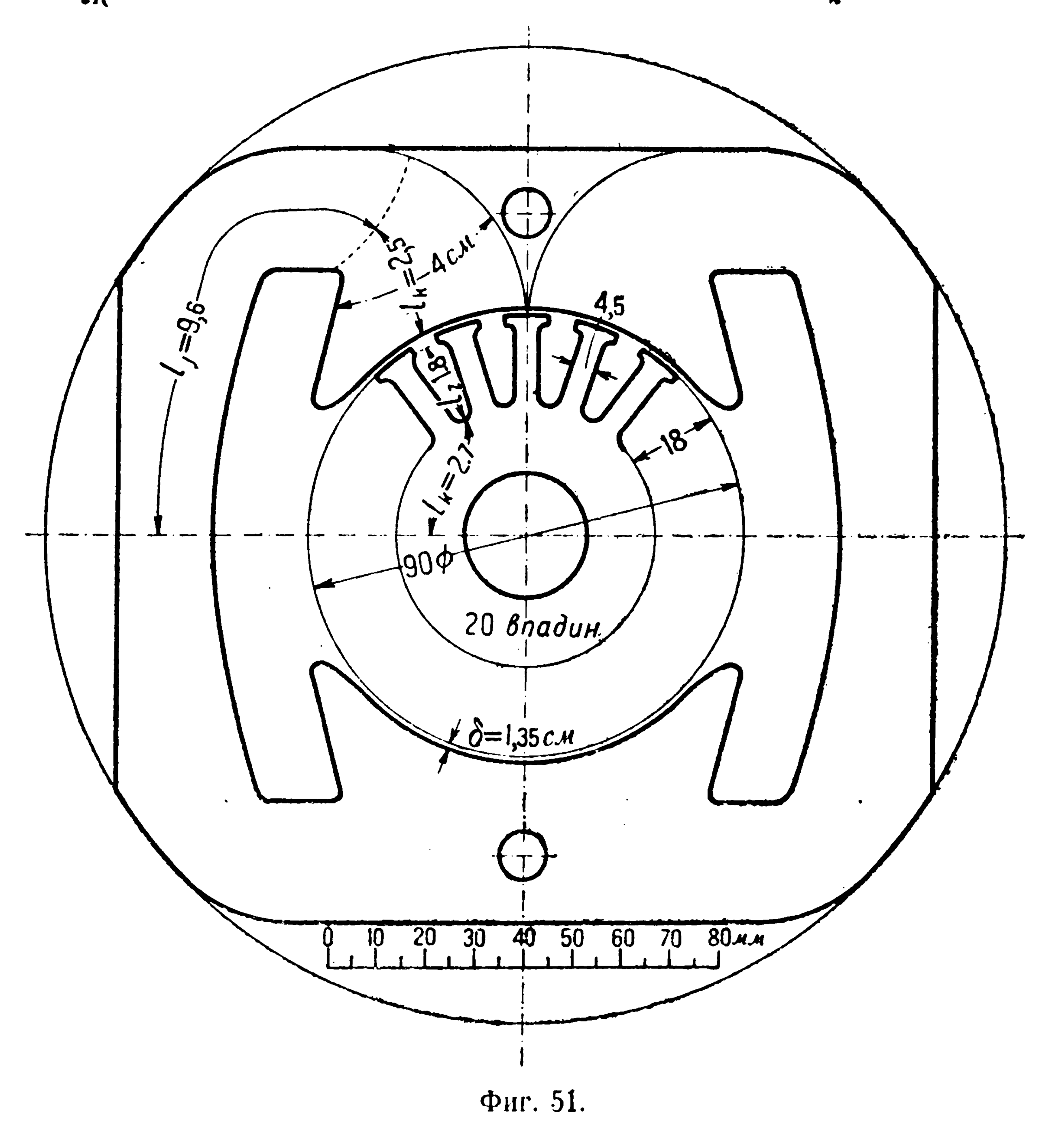
Обмоточное пространство, необходимое для размещения обмотки статора

$$\frac{WR}{0{,}8} = \frac{67 \cdot 2{,}0^2}{0{,}8} \cong 340 \text{ мм}^2.$$

При этих значениях получаем поперечный разрез машины, показанный на фиг. 51.

Далее определяем веса отдельных железных частей:

$$G_{ej} = 2{,}4 \cdot 6{,}5 \cdot 0{,}9 \cdot 9{,}6 \cdot 4 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 4{,}2 \text{ кг} \qquad B_j = 10\,000$$
$$G_{ek} = 4 \cdot 6{,}5 \cdot 0{,}9 \cdot 2{,}5 \cdot 4 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 1{,}8 \text{ кг} \qquad B_k = 6000$$
$$G_{ez} = 20 \cdot 0{,}45 \cdot 1{,}8 \cdot 6{,}5 \cdot 0{,}9 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 0{,}74 \text{ кг} \qquad B_z = 15\,200$$
$$G_{eR} = 4\pi \cdot 1{,}45 \cdot 6{,}5 \cdot 0{,}9 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 0{,}83 \text{ кг} \qquad B_k = 15\,750$$



Фиг. 51.

$$W_{ej} = 7 \cdot 1^2 \cdot 4{,}2 = 29{,}4 \text{ W}$$
$$W_{ek} = 7 \cdot 0{,}6^2 \cdot 1{,}8 = 4{,}5 \text{ „}$$
$$W_{ez} = 14 \cdot 1{,}52 \cdot 0{,}74 = 24{,}0 \text{ „}$$
$$W_{eR} = 14 \cdot 1{,}575 \cdot 0{,}83 = 29{,}1 \text{ „}$$
$$W_e = 87 \text{ W}$$

$$\varepsilon_e = \frac{87}{7{,}4} = 11{,}8 \text{ V},$$

$$\varepsilon = 10{,}3 + 11{,}7 + 2 + 11{,}8 \cong 36 \text{ V},$$

$$E_r = \sqrt{2} \cdot 420 \cdot 100 \cdot 0{,}268 \cdot 10^{-2} = 160 \text{ V},$$

$$\varepsilon_p = \frac{36}{160} \cdot 100 = 22{,}5\% \text{ вместо принятых ранее } 15\%.$$

$$E_w = 36 + 160 = 196 \text{ V}$$

$$E_{s_1} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 2{,}67 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}268 \cdot 10^{-2} = 84 \text{ V}$$

$$E_q = 0{,}085 \cdot 50 \cdot \frac{14{,}1 \cdot 6{,}5}{0{,}12} \cdot 7{,}4 \cdot 420^2 \cdot 10^{-8} = 42 \text{ V}$$

$$E_{ss} = 3 \cdot 50 \cdot 5{,}9 \cdot 7{,}4 \cdot 420^2 \cdot 10^{-8} = 11 \text{ V}$$

$$E_{bl} = 137 \text{ V}$$

$$E_k = \sqrt{196^2 + 137^2} = 239 \text{ V},$$

$$\cos\varphi = \frac{196}{239} = 0{,}82.$$

Так как напряжение на зажимах E_k получилось слишком большим то, уменьшая поток Φ_y путем уменьшения w_1 до 62 на полюс:

$$B_{l\,max} = \frac{62}{67} = 4400 = 4070$$

$$\Phi_y = 4070 \cdot 61 = 0{,}248 \cdot 10^6$$

$$e_t = \frac{62}{67} \cdot 4{,}16 = 3{,}85 \text{ V}$$

$$\varepsilon_k = \frac{2 \cdot 3{,}85^2}{7{,}4 \cdot 0{,}4} = 10 \text{ V}$$

$$W_e = \left(\frac{62}{67}\right)^2 \cdot 87 = 74 \text{ W}$$

$$\varepsilon_e = \frac{74}{7{,}4} = 10 \text{ V}$$

$$\varepsilon = 10{,}3 + 10 + 2 + 10 = 32{,}3 \text{ V}$$

$$E_r = \sqrt{2} \cdot 420 \cdot 100 \cdot 0{,}248 \cdot 10^{-2} = 147 \text{ „}$$

$$E_w = 179{,}3 \text{ V}$$

$$E_{s_1} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 62 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}248 \cdot 10^{-2} = 72 \text{ V}$$

$$E_g \dots\dots\dots = 42 \text{ „}$$

$$E_{ss} \dots\dots\dots = 11 \text{ „}$$

$$E_{bl} = 125 \text{ V}$$

$$E_k = \sqrt{179{,}3^2 + 125^2} = 219 \text{ V},$$

$$\cos\varphi = \frac{179{,}3}{219} = 0{,}82.$$

Коэфициент полезного действия.

$$\varepsilon \cdot I = 32{,}3 \cdot 7{,}4 = 240 \text{ W}.$$

Диаметр цапфы принимаем $d_z = 2$ *см*.
Длину цапфы принимаем $l_z = 4$ *см*.
Тогда

$$v_z = \frac{d_z \cdot \pi \cdot n}{60} = 2\pi = 6{,}28 \text{ м/сек}.$$

Потери на трение:

$$W_R = 0{,}5 \cdot l_z \cdot d_z \sqrt{v_z^3} \text{ на один подшипник},$$
$$W_R = 2 \cdot 0{,}5 \cdot 4 \cdot 2 \sqrt{6{,}28^3} \approx 130 \text{ W},$$
$$W_g = 240 + 130 = 370 \text{ W},$$

потребляемая мощность:

$$P_a = 220 \cdot 7{,}4 \cdot 0{,}82 = 1340 \text{ W}.$$

Отдаваемая мощность:

$$P = 1340 - 370 = 970 \text{ W}$$
$$\eta = 72{,}5\%.$$

Магнитная цепь.

При силе тока $I = 7{,}4$ A получаем:

$$AW_s = \sqrt{2} \cdot 7{,}4 \cdot 62 = 650 \text{ на полюс}.$$

$\Phi_y = 0{,}248 \cdot 10^6$	Q	l	B	aw	AW
Воздушный промежуток	61	0,151	4 070	—	492
Зубцы	17,6	1,7	14 100	13	22
Тело ротора	17	2,7	14 600	17	46
Сердечник	47	2,5	9 300	2,7	7
Ярмо	28	9,6	5 600	7	67
				$\Sigma = 634$	

Воздушный промежуток примем $\delta = 1{,}35$ *мм*, тогда при $b_s = 4$ *мм* и $t_{n1} = 14{,}1$ *мм*

$$a = \frac{b_s}{\delta} = \frac{4}{1{,}35} = 3,$$

$$\beta = \frac{b_s}{t_{n1}} = \frac{4}{14{,}1} = 0{,}284,$$

$$k_l = \frac{1}{1 - \frac{a \cdot \beta}{a + 5}} = \frac{1}{1 - \frac{3 \cdot 0,284}{8}} = 1,12,$$

$$\delta' = k_l \cdot \delta = 1,12 \cdot 1,35 = 1,51 \text{ мм}.$$

Реактивное напряжение.

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0,09 \cdot \pi \cdot 6000}{60} = 9 \cdot \pi = 28,2 \text{ м/сек},$$

$$e_R = 20 \cdot 5,9 \cdot 7 \cdot 110 \cdot 28,2 \cdot 10^{-8} = 2,57 \text{ V}.$$

При хорошей механической конструкции коллектора нет оснований ожидать неблагоприятной коммутации вследствие большого искрообразования.

Коллектор и щетки.

Диаметр коллектора выбираем равным $D_k = 80$ *мм*. Тогда коллекторное деление:

$$t_k = \frac{80 \cdot \pi}{60} = \frac{4\pi}{3} = 4,2 \text{ мм}.$$

Тангенциальную ширину щетки выбираем $b_B = 5$ *мм* и осевую длину ее $l_B = 10$ *мм*. На каждый болт помещаем две щетки, тогда плотность тока

$$\Delta_B = \frac{7,4}{1} = 7,4 \text{ А/см}^2.$$

Размещение статорной обмотки.

$$WR = 2^2 \cdot 62 = 248 \text{ мм}^2,$$

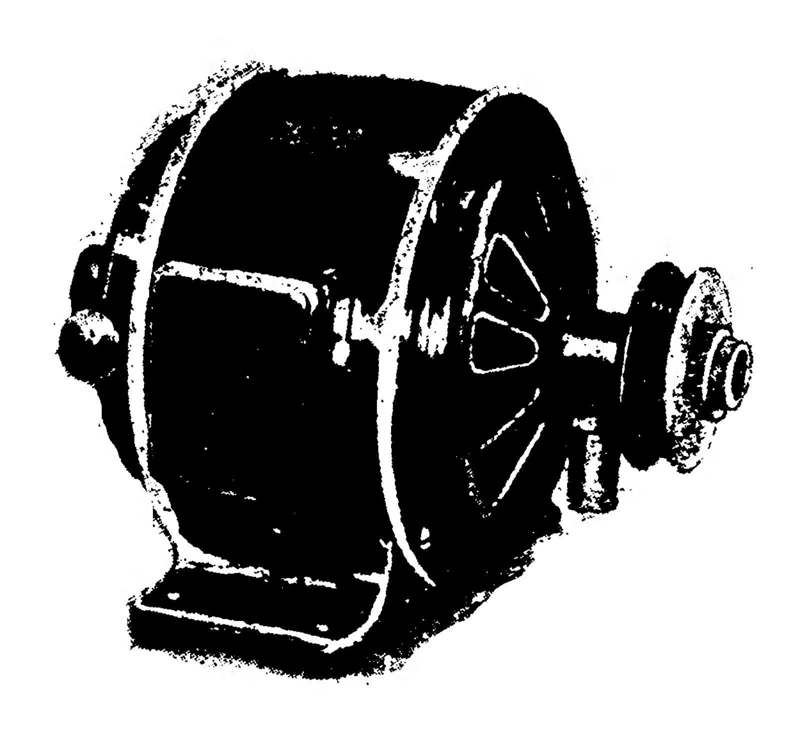
$$F_n = \frac{248}{0,8} = 310 \text{ мм}^2 = 16 \cdot 20.$$

Площадь, имеющаяся на фиг. 51, для этой цели вполне достаточна. Так как машина предназначена работать лишь в качестве двигателя переменного тока, то обмоточное пространство весьма невелико. Это хорошо видно на фиг. 51.

МЕХАНИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ

По своей конструкции рассматриваемые коллекторные двигатели переменного тока отличаются от двигателей постоянного тока лишь тем, что здесь магнитный поток всюду должен проходить по магнитной цепи, собранной из отдельных железных листов. Поэтому целесообразно выштамповывать статорные полюса и ярмо из одного куска, как это показано на фиг. 36, 49 и 51.

На фиг. 52 и 52а показана типичная конструкция двухполюсного двигателя. Из этих фигур также видно, что внешняя оболочка машины служит только для механической защиты, как это имеет место и в случае трехфазного асинхронного двигателя. Роторы этих двигателей почти не отличаются от роторов машин постоянного тока. Рассматриваемые моторы часто строятся для очень большого числа оборотов (как было показано в примере 5), и поэтому вал таких двигателей нужно рассчитывать с точки зрения критического числа оборотов. Если



Фиг. 52.

G — вес ротора,
l_z — расстояние между подшипниками,
I — момент инерции сечения вала,
E — модуль упругости,
d_w — диаметр вала,

то максимальная стрелка прогиба:

$$f = \frac{3}{80}\frac{G \cdot l_z^3}{E \cdot I}\ см$$

и критическое число оборотов:

$$n_{кр} = 300\sqrt{\frac{1}{f}} = \sqrt{\frac{7{,}2 \cdot 10^6 \cdot E \cdot I}{3 \cdot G \cdot l_z^3}}.$$

Так как

$$I = 0{,}0491\, d_w^3$$

и для стали $E = 2{,}2 \cdot 10^6$,
то

$$n_{кр} = 0{,}51 \cdot 10^6 \cdot \frac{d_w}{l_L}\sqrt{\frac{d_w}{l_L} \cdot \frac{1}{G}}. \quad (48)$$

В примере 5:

$G = 4$ *кг*,
$l_z = 23$ *см*,
$d_w = 2{,}5$ *см*,

и следовательно,

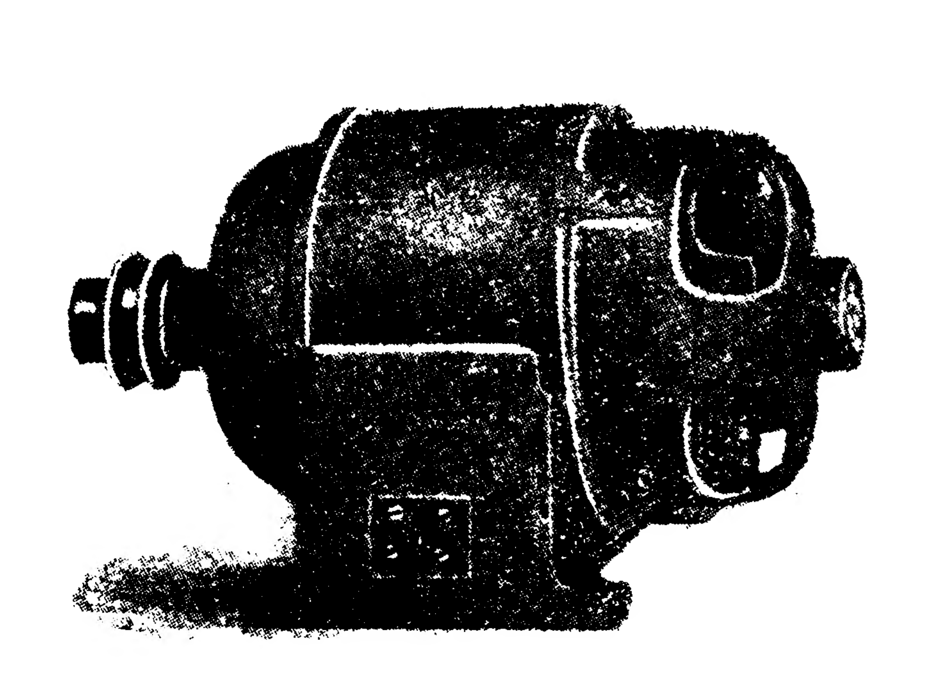
$$n_{кр} = 0{,}51 \cdot 10^6 \frac{2{,}5}{23} \cdot \sqrt{\frac{2{,}5}{23}\,\frac{2}{4}} = 8400\ об/мин.$$

Имеется ряд конструкций, в которых с целью облегчения и удешевления двигателя подшипниковые шипы прикрепляются непо-

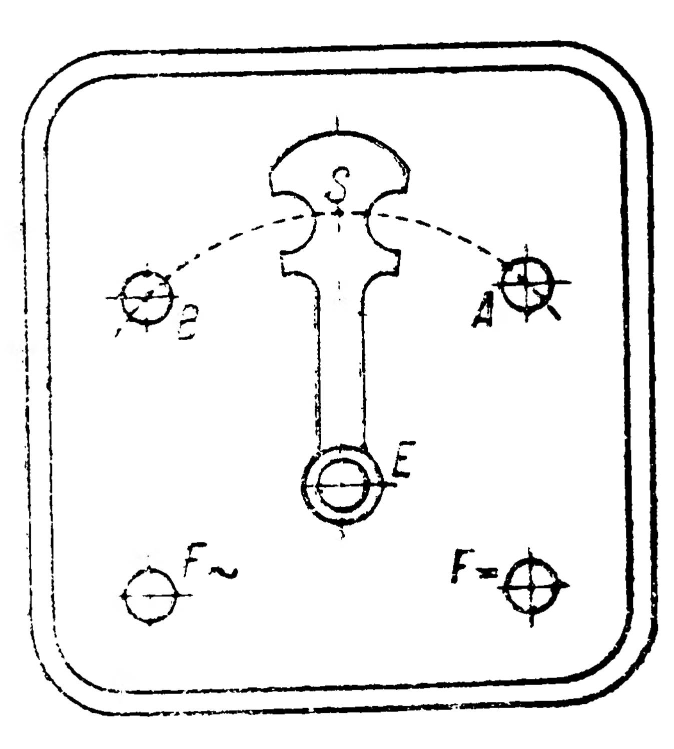
средственно к ярму. При этом рекомендуется не делать в ярме никаких нарезок, а пропускать болты в заранее выштампованные в ярме отверстия и стягивать их гайками на подшипниковых щитах, как это показано на фиг 53. Болты необходимо пропускать в изолирующих втулках. В магнитном отношении пропускание болтов через ярмо неблагоприятно, а в механическом отношении укрепление подшипниковых щитов в этом случае также менее надежно. Преимуществами этого способа являются более дешевое изготовление, меньший вес и меньший объем. То, что болты должны пропускаться через ярмо в местах наиболее слабого потока, не требует особого подчеркивания. Правильное расположение отверстий показано на фиг. 36, 49, 51. Щиток двигателя, на который выведены концы его обмоток в универсальных двигателях, несколько отличается от щитка двигателя постоянного тока вследствие наличия в статоре двух обмоток. Схемы включений, показанные на фиг. 26, могут быть легко получены с помощью расположения зажимов,



Фиг. 52а.



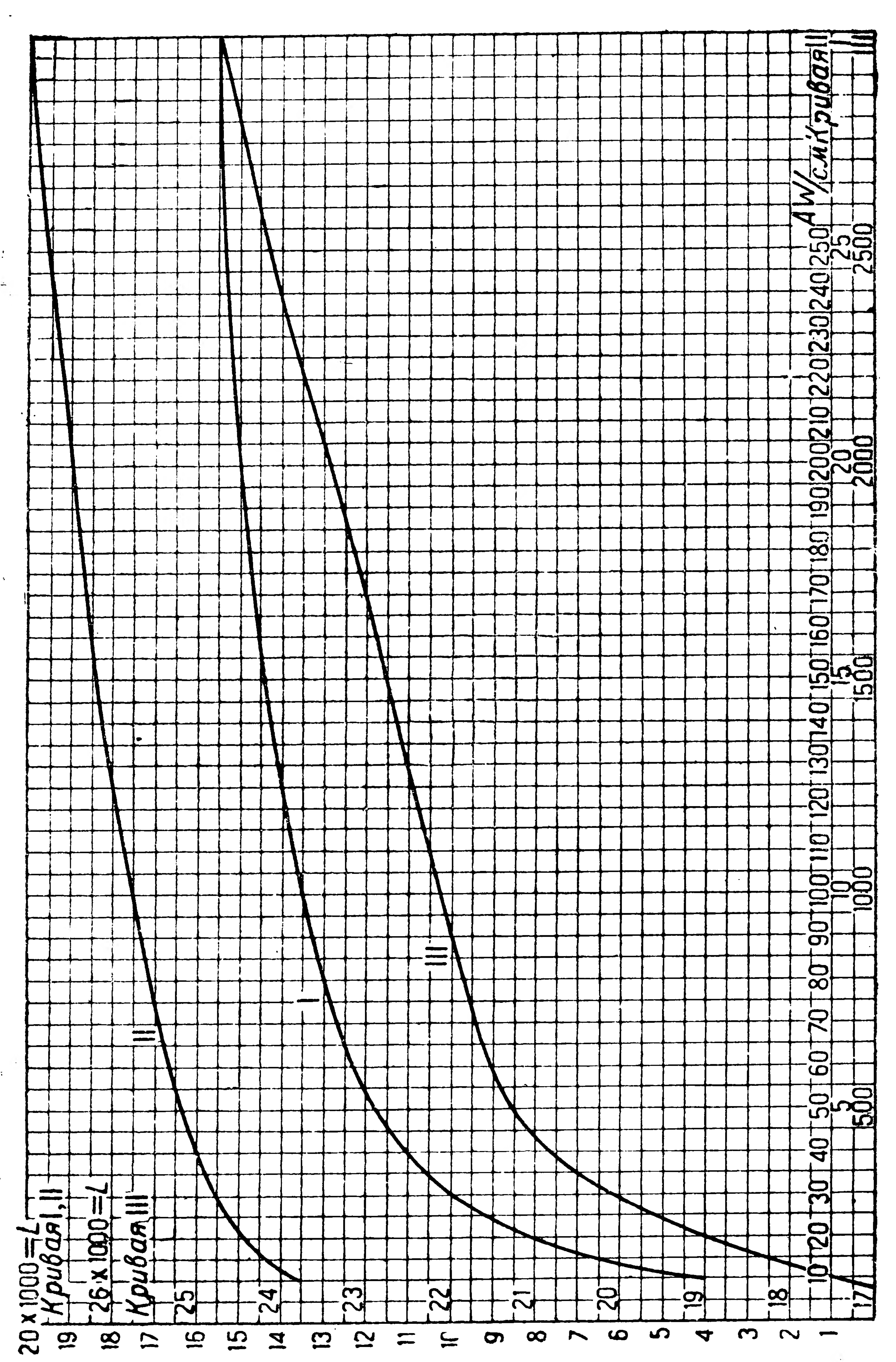
Фиг. 53.



Фиг. 54.

показанного на фиг. 54. При повороте рычага S вправо, т. е. при соединении E с A, двигатель вращается вправо, при повороте же рычага влево, т. е. при соединении E с B, двигатель вращается влево. К зажиму E присоединяется один провод сети, а другой — в случае переменного тока к зажиму $F_{\sim}$, а в случае постоянного тока — к $F_{=}$.

Кривые намагничивания динамного железа марки *А*. Мягкое хорошо рафинированное железо с содержанием 0,5% Si, уд. вес 7,8, число потерь $v_{10} = 3{,}3$ W/*кг*, толщина листов 0,5 *мм*.



Фиг. 55.

К. МЕТЦЛЕР

РАСЧЕТ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1 9 3 2